



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTA' DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE

EFFETTI DI PIANTUMAZIONI LOCALI
SUL MICROCLIMA URBANO

Effects of local plantings on the urban microclimate

Relatore:

Prof. Ing. Passerini Giorgio

Tesi di Laurea di

Pesci Silvia

Correlatrice:

Dott.sa Ing. Chiappini Alessandra

A.A. 2021 / 2022

ABSTRACT

La presente tesi ha come obiettivo l'analisi dell'effetto mitigativo della vegetazione sull'isola di calore urbana (Urban Heat Island UHI), un fenomeno in vertiginoso aumento negli ultimi anni a causa del cambiamento climatico oltre che dell'incremento dell'industrializzazione e dell'urbanizzazione, che ha portato ad una graduale sostituzione di spazi verdi con superfici cementate e una significativa crescita dell'uso di energia con conseguente innalzamento della temperatura all'interno dei centri cittadini.

È facile quindi capire che i primi ad essere svantaggiati da tale fenomeno sono proprio coloro che vivono in città per i quali si ha un sensibile danneggiamento della salute psico-fisica e della qualità della vita. Questo, unito al fatto che né i cambiamenti climatici né l'inurbamento apprestano a fermarsi, rende evidente la necessità di intervenire concretamente ed efficacemente contro tale problema che assume una connotazione non solo climatica ma anche sociale.

Dopo un breve excursus sulle cause, conseguenze e possibili tecniche di mitigazione dell'isola di calore urbana, si è concentrata l'attenzione su quella che viene considerata la soluzione più economica e di più facile attuazione: il verde urbano.

Per analizzare i benefici apportati dall'inverdimento delle aree urbane si è scelto di utilizzare ENVI-met, un software di modellazione microclimatica tridimensionale, che permette di creare simulazioni a supporto della progettazione.

In particolare il caso studio oggetto della presente tesi prende il via da un progetto di riqualificazione attualmente in atto, di Via del Mare a Porto d'Ascoli in provincia di San Benedetto del Tronto.

Esso prevede una sostituzione dei pini attualmente presenti con delle palme e un cambiamento del materiale utilizzato per il marciapiede: da calcestruzzo grigio a calcestruzzo chiaro.

Per studiare come tali modifiche possano impattare sul clima sono state condotte, sia per il periodo estivo sia per il periodo invernale, tre simulazioni riguardanti lo stato di fatto, caratterizzato da pini e calcestruzzo grigio; lo stato intermedio, senza pini e con calcestruzzo chiaro, e lo stato finale futuro con palme e calcestruzzo chiaro.

Infine i risultati ottenuti da tali simulazioni sono stati letti, sottoforma di mappe croamatiche, sia in termini di temperatura potenziale dell'aria sia in termini di due indici di comfort termico: PMV e PPD.

Così facendo si è giunti alla conclusione che il lavoro di riqualificazione di Via del Mare risulta essere vantaggioso se si considera la sostituzione del materiale utilizzato per il marciapiede ma non sono altrettanto rilevanti i benefici apportati dalla sostituzione dei pini con le palme. Questo conferma che, pur essendo la vegetazione una tecnica di mitigazione dell'isola di calore urbana assodata, la sua efficacia è variabile a seconda della tipologia di specie arboree utilizzate oltre che del loro posizionamento.

INDICE

ABSTRACT	2
INDICE DELLE FIGURE	6
INDICE DELLE TABELLE	14
L'ISOLA DI CALORE URBANA	15
1.1 Definizione e descrizione dell'isola di calore urbana	15
<i>1.1.1 Tipologie di isola di calore urbana</i>	18
1.2 Bilancio energetico Terra-Sole	24
<i>1.2.1 Bilancio radiativo al suolo</i>	24
<i>1.2.2 Bilancio termico al suolo</i>	29
1.3 Evapotraspirazione	32
<i>1.3.1 Metodi di calcolo dell'evapotraspirazione</i>	34
<i>1.3.2 Rapporto di Bowen</i>	36
1.4 Cause dell'isola di calore urbana	38
<i>1.4.1 Proprietà termiche e radiative dei materiali usati per le superfici urbane</i>	38
<i>1.4.2 Calore antropogenico</i>	41
<i>1.4.3 Morfologia del centro urbano</i>	42
<i>1.4.4 Scarsità di vegetazione</i>	46
1.5 Conseguenze dell'isola di calore urbana	47
1.6 Tecniche di mitigazione dell'isola di calore urbana	51
IL VERDE URBANO COME STRUMENTO DI MITIGAZIONE	56
2.1 Effetti climatici della vegetazione	64
2.2 Effetti non climatici della vegetazione	69
2.3 Tipologia di verde urbano	77
FUNZIONAMENTO DEL SOFTWARE ENVI-met	92

3.1 Introduzione	92
3.2 Struttura del Software	94
3.2.1 <i>Input</i>	96
3.2.2 <i>ENVI-core</i>	102
3.2.3 <i>Output</i>	102
3.2.4 <i>BIO-met</i>	104
3.3 Limiti di ENVI-met	105
SIMULAZIONI SVOLTE IN ENVI-met PER VIA DEL MARE PORTO D'ASCOLI (SAN BENEDETTO DEL TRONTO).....	
	107
4.1 Metodo e finalità delle simulazioni	107
4.2 Simulazioni estive	112
4.2.1 <i>Stato di fatto</i>	112
4.2.2 <i>Stato intermedio</i>	115
4.2.3 <i>Stato finale</i>	117
4.2.4 <i>Indici di comfort termico PMV e PPD</i>	118
4.3 Simulazioni invernali	124
4.3.1 <i>Stato di fatto</i>	124
4.3.2 <i>Stato intermedio</i>	126
4.3.3 <i>Stato finale</i>	127
CONCLUSIONI	128
BIBLIOGRAFIA	129
SITOGRAFIA	136
RINGRAZIAMENTI	138

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1.1 Rappresentazione grafica dell'isola di calore urbana ("Boundary Layer Climates" T.R. Oke 1987).....	15
Figura 1.2 Correlazione tra massima intensità dell'isola di calore urbana ΔT_{u-r} (max) e popolazione in tre diverse aree geografiche: Nord America, Europa e Giappone/Corea (T.R. Oke "Urban Climates and Global Environmental Change." In: Thompson, R.D. and A. Perry (eds.) "Applied Climatology: Principles & Practices." 1997).....	16
Figura 1.3 Confronto tra andamento della temperatura dell'aria urbana e rurale in condizioni climatiche ideali: vento debole e cielo sereno (a) e andamento dell'intensità dell'isola di calore urbano durante l'arco della giornata (b) ("Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies" U.S. EPA grafico ripreso e modificato da Oke (1982) e Runnalls e Oke (2000)).....	17
Figura 1.4 Isoterme annue nell'area di Parigi (Landsberg "The Urban Climate" 1981).....	18
Figura 1.5 Classificazione dei tipi di isole di calore urbane più comunemente riscontrati (T.R. Oke "The Heat Island of the Urban Boundary Layer: Characteristics, Causes and Effects" 1995).....	18
Figura 1.6 Potenziali fonti di calore antropiche e naturali nelle aree urbane e diffusione di calore nel sottosuolo ("Subsurface urban heat islands in German cities" Bayer P. et al. 2013)	
Figura 1.7 Grafici con confronto tra andamento della temperatura del sottosuolo in un contesto urbano e in un contesto rurale e andamento dell'intensità dell'isola di calore del sottosuolo in funzione dei mesi (Zhiwen Luo e Christina Asproudi "Subsurface urban heat island and its effects on horizontal ground-source heat pump potential under climate change" 2015).....	21

Figura 1.8 Andamento della temperatura superficiale e della temperatura dell'aria in funzione dell'uso del suolo di giorno e di notte. (grafico di Voogt J. 2000 ripreso e modificato da Oke T.R. 2003).....	22
Figura 1.9 Schema delle tre possibili scale orizzontali e degli strati verticali individuabili in ciascuna scala (T.R. Oke-“Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites” 2004).....	23
Figura 1.10 Flussi di energia in ingresso e in uscita dalla superficie terrestre (Effetto serra - Wikipedia).....	24
Figura 1.11 Andamento delle emissioni di anidride carbonica e aumento di temperatura al 2100 (rispetto al periodo 1850-1900) associati a ciascun RCP. Fonte: (Fuss et al. 2014).....	29
Figura 1.12 Assorbimento, riflessione e trasmissione della radiazione incidente da parte di un materiale semitrasparente. (“Termodinamica e trasmissione del calore” Yunus A. Çengel).31	
Figura 1.13 Bilancio energetico superficiale (Isola calore e bilancio energetico.pdf (dicatechpoliba.it).....	33
Figura 1.14 Schema di evapotraspirazione (Evapotraspirazione - Wikipedia).....	34
Figura 1.15 Confronto tra evapotraspirazione potenziale di riferimento ET ₀ , evapotraspirazione effettiva in condizioni standard Etc ed evapotraspirazione effettiva in condizioni non standard ETc adj (Richard G. Allen, Luis S. Pereira, Dirk Raes, Martin Smith. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma, 1998).....	36
Figura 1.16 Parametri geometrici necessari a caratterizzare un canyon urbano (http://www.arpalazio.net/main/aria/didattica/corso01/Micro_meteo_08_2011.pdf).....	44
Figura 1.17 regimi di flusso associati al flusso d'aria su matrici di edifici al variare di W/H (Oke T.R. “Street Design and Urban Canopy Layer Climate” 1988).....	45
Figura 1.18 regimi di flusso associati al flusso d'aria su matrici di edifici al variare di W/H (Oke T.R. “Street Design and Urban Canopy Layer Climate” 1988).....	45

Figura 1.19 regimi di flusso associati al flusso d'aria su matrici di edifici al variare di W/H (Oke T.R. "Street Design and Urban Canopy Layer Climate" 1988).....	46
Figura 1.20 Rapporto tra UHI _{max} ($\Delta T_{u-r(max)}$) e il fattore di forma del canyon urbano (H/W) basato su osservazioni in 31 città american (•), europee (◦) e australiane (+)(https://docs.dicatechpoliba.it/filemanager/417/Isola%20calore%20e%20bilancio%20energetico.pdf).....	46
Figura 1.21 Rappresentazione schematica di un canyon urbano e dei molteplici riflessi e assorbimenti che si verificano al suo interno (Nunez and Oke, "The Energy Balance of an Urban Canyon" 1977).....	47
Figura 1.22 (a) Vista schematica di un canyon urbano simmetrico (b) fattore di vista del cielo (SVF) in funzione del fattore di forma (H/W) (After Erell et al, "Urban Microclimate", 2011).....	48
Figura 1.23 The Necessity of using Sky View Factor in Urban Planning: a Case Study of Narmak Neighborhood, Tehran Mojtaba Rafieian, Hadi Rezaei Rad, Ayyoob Sharifi (2014).....	48
Figura 2.1 Schema degli scambi energetici tra vegetazione e ambiente circostante. ("Spazi verdi urbani" – G. Scudo, J.M.O de la Torre 2003).....	61
Figura 2.2 Le tre classi di dimensione degli alberi a completa maturità (Piano del Verde del Comune di Padova).....	65
Figura 2.3 Il portamento degli alberi (Piano del Verde del Comune di Padova).....	66
Figura 2.4 Effetti della vegetazione sul flusso di vento (Andrea Giacchetta docente di progettazione bioclimatica facoltà di architettura di Genova).....	70
Figura 2.5 Influenza del manto fogliare nei profili di velocità del vento in un bosco di querce con e senza foglie. ("Spazi verdi urbani" - G. Scudo, J.M.O de la Torre 2003).....	71
Figura 2.6 Schema del flusso di vento nel caso di filare denso (Andrea Giacchetta docente di progettazione bioclimatica facoltà di architettura di Genova).....	71

Figura 2.7 Schema del flusso di vento nel caso di filare denso (Andrea Giacchetta docente di progettazione bioclimatica facoltà di architettura di Genova).....	71
Figura 2.8 Schema del flusso di vento nel caso di filare denso (Andrea Giacchetta docente di progettazione bioclimatica facoltà di architettura di Genova).....	72
Figura 2.9 Diversi tipi di barriere frangivento con indicazioni qualitative sulla modifica dei flussi di vento. (“Spazi verdi urbani” - G. Scudo, J.M.O de la Torre 2003).....	72
Figura 2.10 Schemi dei flussi d'aria in una struttura urbana in condizioni meteorologiche di assenza di vento e in assenza di verde (figura 1), in presenza di verde (figura 2) e durante l’arco di una giornata. (“Spazi verdi urbani” - G. Scudo, J.M.O de la Torre 2003).....	79
Figura 2.11 Diverse capacità di scorrimento/assorbimento della pioggia in funzione delle caratteristiche di permeabilità delle superfici. (“Spazi verdi urbani” - G. Scudo, J.M.O de la Torre 2003).....	80
Figura 2.12 Intensità e range dell’effetto di raffreddamento di un’area verde urbana (Honjo e Takakura “Simulation of Thermal Effects of Urban Green Area on their Surrounding Areas” 1991).....	83
Figura 2.13 Tipi di pavimentazioni permeabili e semi-permeabili con coefficiente di deflusso, percentuale di verde e principali usi (“Linee guida per la gestione sostenibile delle acque meteoriche Provincia autonoma di Bolzano”).....	87
Figura 2.14 Particolare riguardante l’alternanza di pavimentazioni drenanti PLATdesign, NSE Kitakyushu Technology Center, Giappone, Fukuoka, 2011 (http://landezine.com/index.php/2013/01/nse-kitakyushu-technology-center-by-platdesign/).....	88
Figura 2.15 Particolare di grigliato in calcestruzzo inerbato: pavimentazione permeabile Venlo Talentencampus (Paesi Bassi) Carve Landscape (https://landezine.com/venlo-talentencampus-by-carve-landscape-architecture/).....	88
Figura 2.16 Possibili disposizioni dei filari alberati (Piano del Verde del Comune di Padova).....	89

Figura 2.17 Constitution Avenue, Canberra (Australia). Jane Irwin Landscape Architecture (https://landezine.com/constitution-avenue-canberra-by-jane-irwin-landscape-architecture/).....	90
Figura 2.18 Un esempio di un'area giochi (a Tortona) con pavimentazione antitrauma e con vegetazione. (www.proludic.it).....	91
Figura 2.19 Orti fioriti di City Life-Milano (https://www.orticola.org/?p=9947).....	92
Figura 2.20 Stratigrafia tetto verde intensivo (https://prodottiesoluzioni.indexspa.it/).....	94
Figura 2.21 Stratigrafia tetto verde intensivo (https://prodottiesoluzioni.indexspa.it/).....	94
Figura 2.22 Schema di modelli per la simulazione (“Simulazione del microclima urbano di Milano mediante il software ENVI-met” Marta Bisson).....	96
Figura 2.23 Analisi della temperatura in funzione della quota (“Simulazione del microclima urbano di Milano mediante il software ENVI-met” Marta Bisson).....	97
Figura 2.24 Andamento giornaliero della temperatura e della temperatura in funzione della quota per il Modello 1 (Marta Bisson, “Simulazione del microclima urbano di Milano mediante il software ENVI-met”).....	98
Figura 2.25 Andamento giornaliero della temperatura e della temperatura in funzione della quota per il Modello 2 (Marta Bisson, “Simulazione del microclima urbano di Milano mediante il software ENVI-met”).....	98
Figura 3.1 Schema della struttura del software ENVI-met (“ENVI-MET principi fisici della modellazione del comfort outdoor” Kristina Fabbri 2015).....	102
Figura 3.2 Sezione ENVI-met Data and Setting.....	102
Figura 3.3 Sezione ENVI-met Projects/Workspaces Organize.....	103
Figura 3.4 Interfaccia Spaces, ENVI-met.....	104
Figura 3.5 Change or create model domain settings-Model Location, ENVI-met.....	104

Figura 3.6 Change or create model domain settings-Model Geometry, ENVI-met.....	105
Figura 3.7 Display and Edit DEM options-Spaces, ENVI-met	106
Figura 3.8 Display and Edit Buildings options-Spaces, ENVI-met.....	106
Figura 3.9 Interfaccia ENVI-guide-General Settings, ENVI-met.....	108
Figura 3.10 Interfaccia ENVI-guide-Meteorology, ENVI-met.....	109
Figura 3.11 Interfaccia ENVI-core, ENVI-met.....	110
Figura 3.12 Interfaccia Leonardo. ENVI-met.....	112
Figura 3.13 Interfaccia BIO-met, ENVI-met.....	113
Figura 4.1 Dominio dell'area di studio (Google Maps, Street View).....	107
Figura 4.2 Immagine .bmp dominio dell'area di studio.....	107
Figura 4.3 Proprietà tecniche dei materiali utilizzati per il suolo e le superfici presenti in DB Manager, ENVI-met.....	108
Figura 4.4 Proprietà tecniche dei due calcestruzzi utilizzati per il marciapiede presenti in DB Manager, ENVI-met.....	109
Figura 4.5 Proprietà Pinus Pinea presenti in Albero, ENVI-met.....	110
Figura 4.6 Proprietà Pinus Pinea presenti in Albero, ENVI-met.....	110
Figura 4.7 Proprietà Palm, small trunk, dense, small (5m) presenti in Albero, ENVI-met.....	110
Figura 4.8 Proprietà Palm, small trunk, dense, small (5m) presenti in Albero, ENVI-met.....	110

Figura 4.9 Soil and surface dell'area della simulazione con marciapiede in calcestruzzo chiaro visualizzata in Spaces, ENVI-met.....	112
Figura 4.10 Vegetation dell'area della simulazione con pini visualizzata in Spaces, ENVI-met.....	112
Figura 4.11 Output simulazione estiva stato di fatto visualizzato in Leonardo, ENVI-met.....	113
Figura 4.12 Soil and surface dell'area della simulazione con marciapiede in calcestruzzo chiaro visualizzata in Spaces, ENVI-met.....	114
Figura 4.13 Vegetation dell'area della simulazione senza pini visualizzata in Spaces, ENVI-met.....	114
Figura 4.14 Output simulazione estiva stato intermedio visualizzato in Leonardo, ENVI-met.....	115
Figura 4.15 Soil and surface dell'area della simulazione con marciapiede in calcestruzzo chiaro visualizzata in Spaces, ENVI-met.....	116
Figura 4.16 Vegetation dell'area della simulazione con palme visualizzata in Spaces, ENVI-met.....	117
Figura 4.17 Output simulazione estiva stato finale visualizzato in Leonardo, ENVI-met.....	117
Figura 4.18 Output simulazione estiva stato di fatto visualizzato in Leonardo, ENVI-met-PMV	118
Figura4.19 Output simulazione estiva stato di fatto visualizzato in Leonardo, ENVI-met-PPD	119
Figura4.20 Output simulazione estiva stato intermedio visualizzato in Leonardo, ENVI-met-PMV	120

Figura 4.21 Output simulazione estiva stato intermedio visualizzato in Leonardo, ENVI-met-PPD.....	121
Figura 4.22 Output simulazione estiva stato finale visualizzato in Leonardo, ENVI-met-PMV.....	122
Figura 4.23 Output simulazione estiva stato finale visualizzato in Leonardo, ENVI-met-PPD.....	123
Figura 4.24 Output simulazione invernale stato iniziale visualizzato in Leonardo, ENVI-met.....	124
Figura 4.25 Output simulazione invernale stato intermedio visualizzato in Leonardo, ENVI-met.....	125
Figura 4.26 Output simulazione invernale stato finale visualizzato in Leonardo, ENVI-met.....	126

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1.1 Confronto tra le caratteristiche dell'isola di calore superficiale e atmosferica (Climate Protection Partnership Division in the U.S. Environmental Protection Agency's Office of Atmospheric Programs, 2009).....	20
Tabella 1.2 Valori di albedo dei principali tipi di nubi (Giorgio Passerini 2021/2022).....	27
Tabella 1.3 Valori di albedo delle diverse superfici (Giorgio Passerini 2021/2022).....	27
Tabella 1.4 Composizione chimica media dell'atmosfera in condizioni normali (Giorgio Passerini 2021/2022).....	28
Tabella 1.5 Valori tipici del rapporto di Bowen per diverse coperture del terreno ("Analisi del comportamento energetico di un fabbricato-tipo in assenza/presenza di tetto/parete verde per ottimizzare l'efficienza energetica degli edifici in area urbana" Fabio Fantozzi, Carlo Bibbiani, Caterina Gargari ENEA).....	37
Tabella 1.6 proprietà termiche dei materiali utilizzati negli edifici e nelle costruzioni.....	40
Tabella 1.7 campo di variabilità dell'indice PMV ("Indici di valutazione per ambienti moderati" INAIL 2022).....	48
Tabella 2.1 Coefficienti di ombreggiamento per diverse specie nella stagione invernale ed estiva. ("Spazi verdi urbani" - G. Scudo, J.M.O de la Torre 2003).....	58
Tabella 2.2 Classificazione di alcune specie comunemente utilizzate per tipo di portamento. ("Spazi verdi urbani" - G. Scudo, J.M.O de la Torre 2003).....	52

Capitolo 1

L'ISOLA DI CALORE URBANA

1.1 Definizione e descrizione dell'isola di calore urbana

L'isola di calore urbana (Urban Heat Island-UHI) è un fenomeno microclimatico che si sviluppa nei centri cittadini ivi determinando un aumento della temperatura, variabile tra 1°C-3°C, rispetto alle circostanti aree industriali, residenziali urbane/suburbane e rurali.

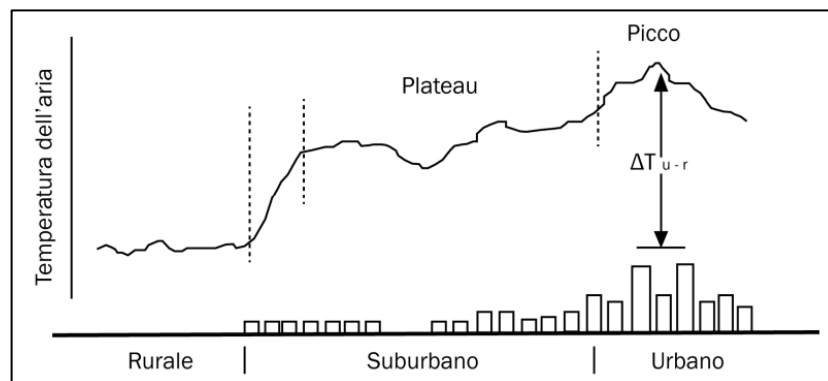


Figura 1.1 Rappresentazione grafica dell'isola di calore urbana ("Boundary Layer Climates" T.R. Oke 1987)

Secondo quanto stabilito da T.R. Oke all'interno di "Applied Climatology: Principles & Practices" (1997) l'incremento di temperatura può superare i 12°C durante le notti serene e non ventilate in quanto la scarsa nuvolosità non permette di bloccare la radiazione solare incidente e l'assenza di vento non garantisce il trasporto di aria più fresca dalle aree vicine.

Kassomenos P.A. and Katsoulis B.D. (2006) nel documento intitolato "Mesoscale and macroscale aspects of the morning Urban Heat Island around Athens, Greece" presente all'interno del libro "Meteorology and Atmospheric Physics" aggiungono una bassa umidità relativa come ulteriore parametro da cui dipende un incremento di temperatura più elevato.

Oltre al momento temporale della giornata, la nuvolosità, la velocità del vento e l'umidità relativa le altre variabili che incidono sull'intensità dell'isola di calore urbana, definita come la differenza tra la temperatura urbana e la temperatura rurale (Urban Heat Island Intensity UHII=

$T_{urban}-T_{rural}$), sono la stagionalità e la posizione geografica (a seconda della quale si hanno diverse caratteristiche topografiche, una diversa natura dei suoli, una diversa vegetazione, una diversa quantità di corpi idrici presenti e un diverso uso del suolo).

In particolare, l'UHII è maggiore durante l'alta stagione e alle medie e basse latitudini dove, secondo quanto stabilito da Haider Taha nel suo documento "Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat" (1997), il clima è generalmente più caldo.

Infine, l'UHII risulta aumentare proporzionalmente alla dimensione del centro urbano (espressa in termini di popolazione) come enunciato da Oke sia in "The Energetic Basis of the Urban Heat Island" (1982) sia in "Applied Climatology: Principles & Practices" (1997) all'interno dei quali viene posta l'attenzione su quanto il rapporto tra dimensione della città e isola di calore urbana cambi da città a città non solo a causa del loro diverso clima ma anche a causa della loro diversa natura (geometria urbana, quantità di spazi verdi presenti, tipologia di materiali utilizzati, tipologia di aree circostanti il centro cittadino).

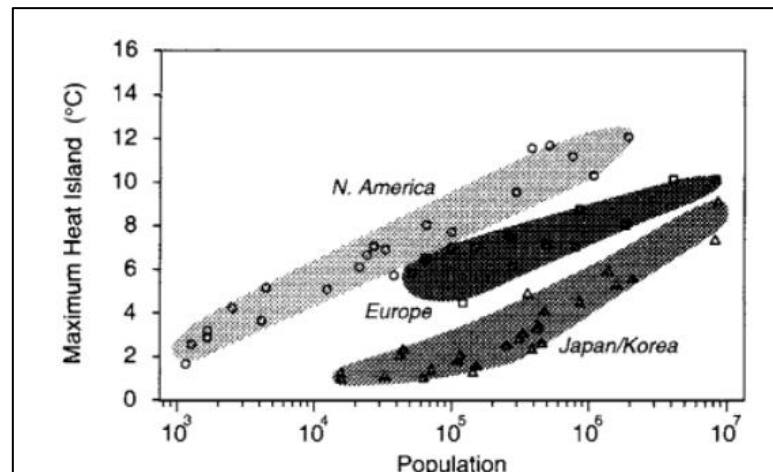


Figura 1.2 Correlazione tra massima intensità dell'isola di calore urbana ΔT_{u-r} (max) e popolazione in tre diverse aree geografiche: Nord America, Europa e Giappone/Corea (T.R. Oke "Urban Climates and Global Environmental Change." In: Thompson, R.D. and A. Perry (eds.) "Applied Climatology: Principles & Practices." 1997)

Quindi si può concludere che l'isola di calore urbana deriva principalmente da una diversa velocità di raffreddamento tra le aree urbane e le circostanti aree rurali o periurbane. La differenza tra le due velocità di raffreddamento risulta essere massima di notte durante la quale nelle aree urbane, a differenza delle aree rurali, si ha il rilascio di una grande quantità di calore accumulato durante il giorno dalle superfici a basso albedo: questo comporta una temperatura dell'aria cittadina evidentemente e costantemente più elevata rispetto a quella della campagna limitrofa.

A mezzogiorno invece la temperatura in città risulta essere leggermente inferiore rispetto a quella in campagna generando la cosiddetta isola fresca urbana diurna (Urban Cool Island-UCI) che secondo recenti studi si verifica soprattutto in climi aridi, in presenza di canyon urbani

profondi e densi, elevata concentrazione di aerosol, che diminuisce la radiazione solare in entrata, e possibile avvezione di aria più calda verso le aree rurali.

All'alba i moti convettivi indotti dal sorgere del sole innescano una turbolenza che tende a rimescolare i bassi strati atmosferici e a dissipare l'elevata temperatura cittadina; infatti, nella tarda mattinata e per tutto il giorno la temperatura rurale e urbana si uguagliano.

Di conseguenza l'intensità dell'isola di calore urbana assume valori massimi e positivi da dopo il tramonto a poco prima dell'alba, risulta nulla durante la mattina fino ad assumere valori negativi a mezzogiorno.

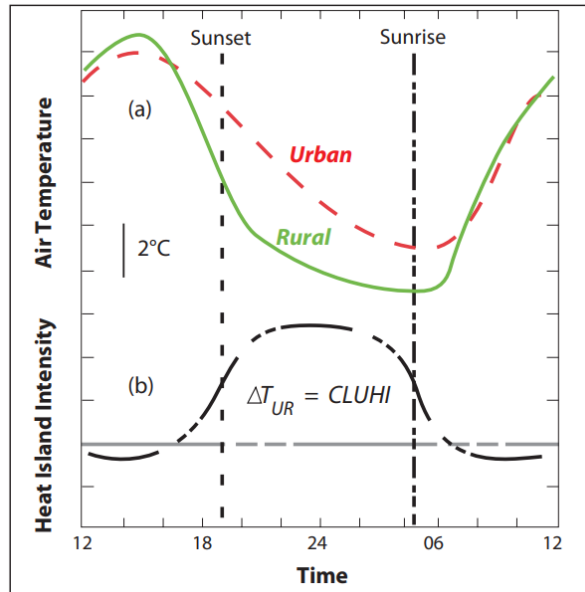


Figura0

1.3 Confronto tra andamento della temperatura dell'aria urbana e rurale in condizioni climatiche ideali: vento debole e cielo sereno (a) e andamento dell'intensità dell'isola di calore urbano durante l'arco della giornata (b) ("Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies" U.S. EPA grafico ripreso e modificato da Oke (1982) e Runnalls e Oke (2000))

Il primo studio del fenomeno risale al 1818, pubblicato dal meteorologo Luke Howard all'interno del suo saggio "The Climate of London". Nonostante ciò, non si ha traccia del termine "isola di calore urbana" fino al 1958 quando appare per la prima volta all'interno del saggio "Quarterly Journal of the Royal Meteorology Society" di Gordon Manley.

Il termine "isola" è riconducibile alla rappresentazione del fenomeno tramite delle isoterme la cui disposizione permette di visualizzare nelle mappe la città interessata dall'incremento termico come un'isola contornata da zone rurali a più bassa temperatura.

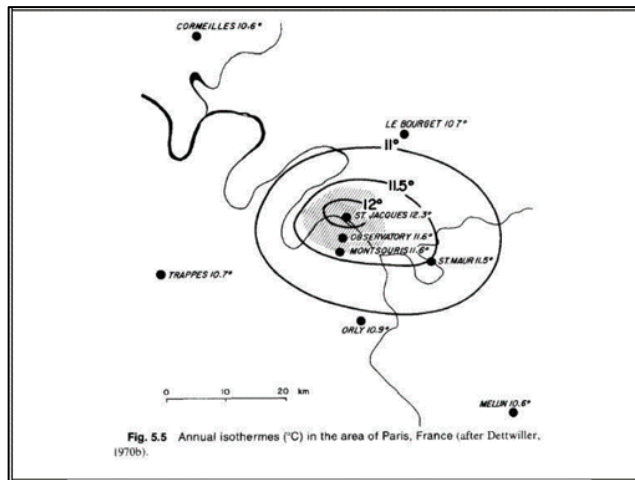


Figura 1.4 Isotherme annue nell'area di Parigi (Landsberg "The Urban Climate" 1981)

1.1.1 Tipologie di isola di calore urbana

Il meteorologo T.R. Oke fornisce una classificazione delle diverse tipologie esistenti di isola di calore urbana all'interno del suo saggio "The Heat Island of the Urban Boundary Layer: Characteristics, Causes and Effects" (1995):

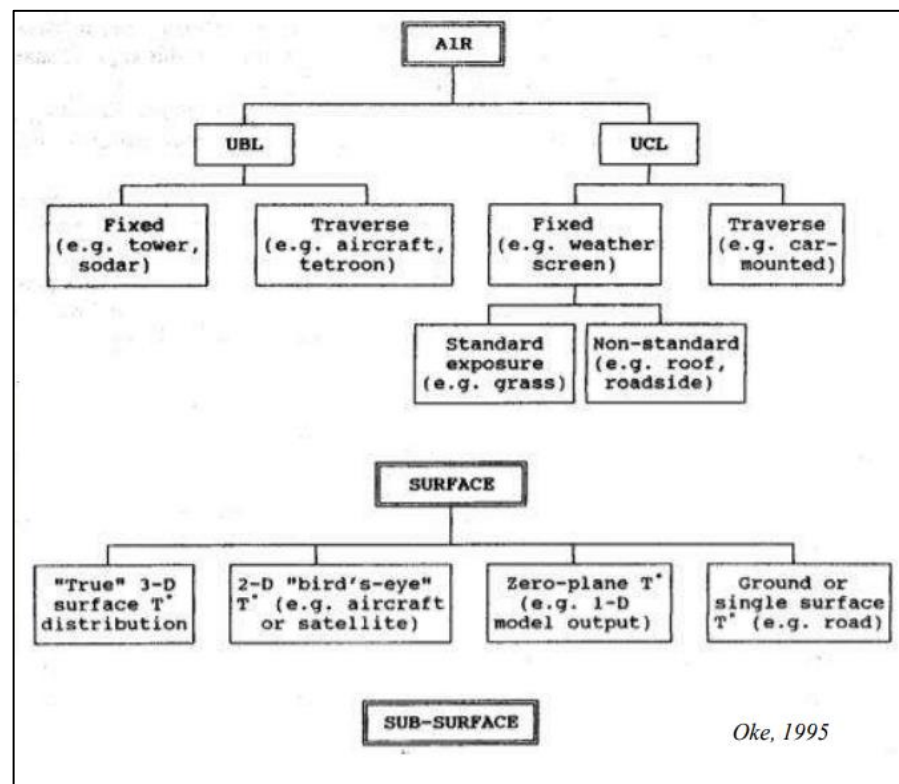


Figura 1.5 Classificazione dei tipi di isole di calore urbane più comunemente riscontrati (T.R. Oke "The Heat Island of the Urban Boundary Layer: Characteristics, Causes and Effects" 1995)

I tre principali tipi di isola di calore urbana sono:

-ISOLA DI CALORE ATMOSFERICA (ATMOSPHERIC URBAN HEAT ISLAND-AUHI)

L'Atmospheric Urban Heat Island è intesa come l'innalzamento della temperatura dell'aria delle zone urbane, di 1-3°C, rispetto alle zone rurali specialmente a causa del rilascio di calore sensibile da parte delle superfici costruite.

Essa si suddivide a sua volta in: Urban Canopy Layer Heat Island (UCLHI) e Urban Boundary Layer Heat Island (UBLHI).

L'Urban Canopy Layer Heat Island (UCLHI) interessa lo strato di copertura urbana (UCL) cioè quello strato in cui ha sede l'isola di calore urbana che influenza la vita della popolazione. Tale strato si estende dalla superficie terrestre fino all'altezza media degli edifici zh e le sue caratteristiche variano da città a città mentre è assente negli spazi aperti.

L'Urban Boundary Layer Heat Island (UBLHI) avviene nello strato limite urbano (UBL) che si estende dall'altezza media degli edifici zh fino alla quota in prossimità della quale l'atmosfera non risulta più influenzata dalla superficie terrestre (max 1,5 Km).

Esistono inoltre due sotto strati dell'isola di calore atmosferica:

Il Roughness SubLayer (RSL) va dalla superficie terrestre fino ad una quota zr che dipende dall'altezza e dalla densità degli elementi di rugosità (tipicamente è il doppio dell'altezza media degli edifici $zr=2zh$). All'interno di questo strato i flussi turbolenti dipendono dalla presenza e tipologia di ostacoli presenti.

L'Inertial SubLayer (ISL) va dalla quota zr fino a circa un decimo dello spessore dello strato di rimescolamento.

Come precedentemente enunciato l'intensità dell'isola di calore atmosferica è massima dopo il tramonto mentre è debole nella tarda mattinata e durante il giorno.

-ISOLA DI CALORE SUPERFICIALE (SURFACE UHI) è il fenomeno causato dall'incidenza della radiazione solare sulle superfici urbane che comporta un aumento della temperatura delle stesse, più elevata di 10-15°C di giorno e 5-10°C di notte, rispetto alla temperatura delle superfici delle aree rurali, le quali riescono a mantenere una minore temperatura in virtù del loro maggiore contenuto d'acqua che viene vaporizzata tramite il processo di evaporazione comportando un conseguentemente raffreddamento. (J.A. Voogt e T.R. Oke, 2003)

L'isola di calore superficiale è strettamente connessa alle proprietà radiative e termiche dei materiali delle superfici urbane ed è variabile con stagionalità, intensità della radiazione solare, uso del suolo e condizioni climatiche.

La sua intensità risulta essere massima di giorno e durante l'estate.

Caratteristica	UHI superficiale	UHI atmosferica
Sviluppo temporale	<ul style="list-style-type: none"> • Presente in ogni momento del giorno e della notte • Più intenso durante il giorno e in estate 	<ul style="list-style-type: none"> • Può essere lieve o inesistente durante il giorno • Più intensa di notte o prima dell'alba e in inverno
Intensità di picco (condizioni di UHI più intense)	Più variazione spaziale e temporale: <ul style="list-style-type: none"> • Giorno: da 10 °C a 15 °C • Notte: da 5 °C a 10 °C 	Minore variazione: <ul style="list-style-type: none"> • Giorno: da -1 °C a 3 °C • Notte: da 7 °C a 12 °C
Metodo di identificazione tipico	Misurazione indiretta: <ul style="list-style-type: none"> • Remote sensing 	Misurazione diretta: <ul style="list-style-type: none"> • Stazioni meteorologiche fisse • Sensoristica montata a bordo di veicoli (monitoraggio dinamico)
Rappresentazione tipica	<ul style="list-style-type: none"> • Immagini termiche 	<ul style="list-style-type: none"> • Mappa isoterma • Grafico di temperatura

Tabella 1.1 Confronto tra le caratteristiche dell'isola di calore superficiale e atmosferica (Climate Protection Partnership Division in the U.S. Environmental Protection Agency's Office of Atmospheric Programs, 2009)

-ISOLA DI CALORE DEL SOTTOSUOLO (SUB-SURFACE UHI) è il fenomeno causato dalla trasmissione di calore al sottosuolo per conduzione ed è caratterizzato da una differenza tra la temperatura dell'acqua che si trova nel sottosuolo in aree urbane e quella dell'acqua del sottosuolo delle aree rurali ("Subsurface urban heat islands in German cities" Bayer P. et al. 2013). Di solito la prima è superiore di 3-7°C rispetto alla seconda e questo è dovuto al calore assorbito dalle superfici urbane, dalle strade e gallerie metropolitane, dalle reti fognarie e dalle reti di teleriscaldamento interrato.

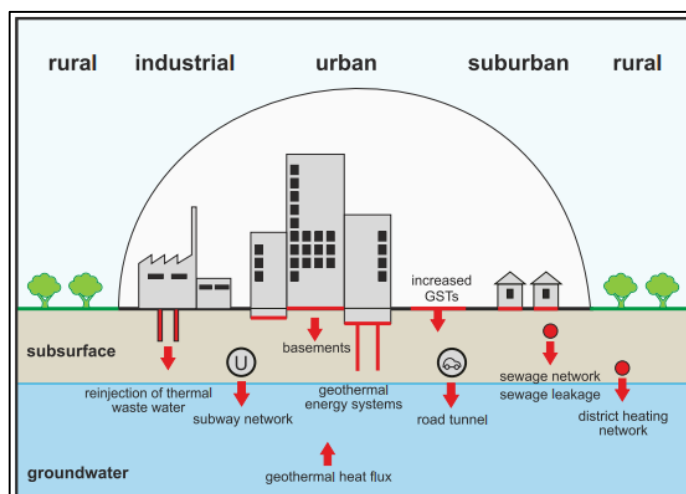


Figura 1.6 Potenziali fonti di calore antropiche e naturali nelle aree urbane e diffusione di calore nel sottosuolo ("Subsurface urban heat islands in German cities" Bayer P. et al. 2013)

Secondo quanto stabilito da Zhiwen Luo e Christina Asproudi all'interno del documento "Subsurface urban heat island and its effects on horizontal ground-source heat pump potential under climate change" (2016) la massima intensità della sub-surface UHI viene rilevata in mesi differenti a seconda delle ore della giornata: alle 6:00 la massima intensità si ha a dicembre, mentre a 12:00, alle 18:00 e a 24:00 si ha a settembre.

Sempre secondo questo studio la minima intensità dell'isola di calore del sottosuolo è stata invece rilevata sempre, indipendentemente dall'ora, nel mese di luglio.

È opportuno però specificare che queste informazioni sono relative allo specifico caso analizzato da Zhiwen Luo e Christina Asproudi e non possono quindi essere prese come universalmente vere.

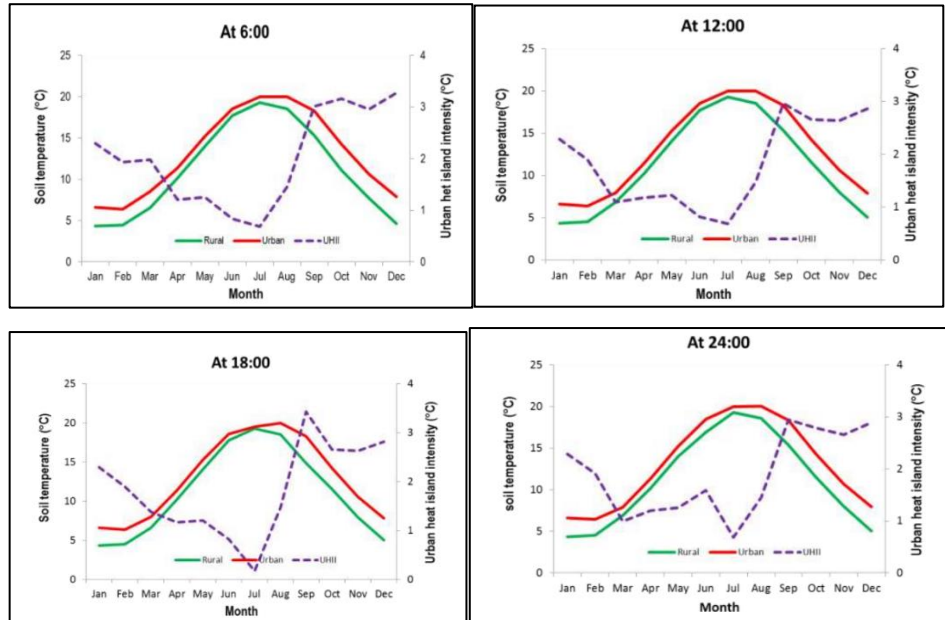


Figura 1.7 Grafici con confronto tra andamento della temperatura del sottosuolo in un contesto urbano e in un contesto rurale e andamento dell'intensità dell'isola di calore del sottosuolo in funzione dei mesi (Zhiwen Luo e Christina Asproudi "Subsurface urban heat island and its effects on horizontal ground-source heat pump potential under climate change" 2016)

Il monitoraggio della temperatura del sottosuolo è molto complesso ma fondamentale per controllare alcuni processi biologici e chimici dell'ecosistema e la temperatura delle falde acquifere, oltre ad avere un impatto importante sulle infrastrutture sotterranee, sull'efficacia delle pompe di calore geotermiche (Blum et al., 2011), sulle applicazioni di accumulo di energia termica nelle falde acquifere o sulle pile di energia (Brandl, 2006)

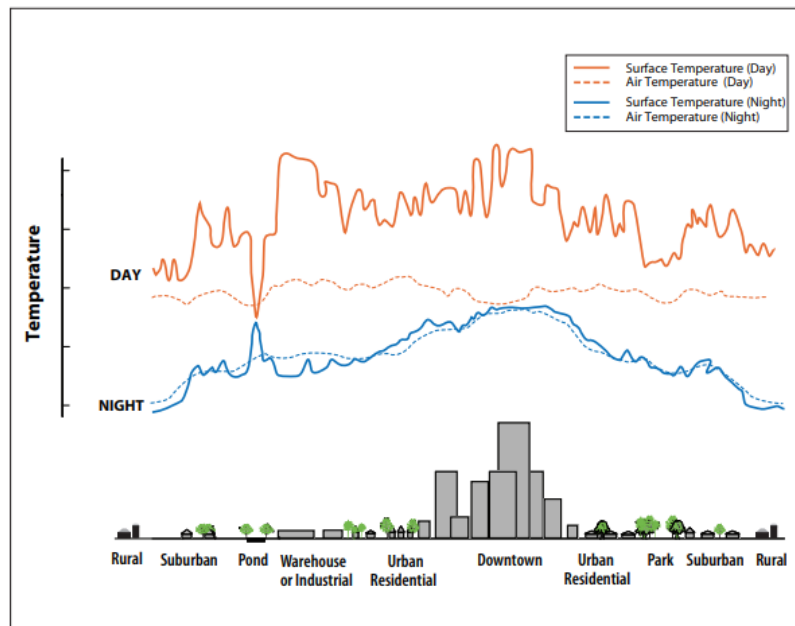


Figura 1.8 Andamento della temperatura superficiale e della temperatura dell'aria in funzione dell'uso del suolo di giorno e di notte. (grafico di Voogt J. 2000 ripreso e modificato da Oke T.R. 2003)

Per un ulteriore approfondimento sulle tipologie di isola di calore si può far riferimento al grafico della figura 1.6 che mostra il collegamento esistente, all'interno del Canopy Layer, tra l'andamento della temperatura superficiale e della temperatura dell'aria in funzione dell'uso del suolo sia di giorno che di notte: una temperatura superficiale bassa (tipica delle zone rurali) contribuisce, a causa dello scambio termico convettivo, ad abbassare in quelle zone anche la temperatura dell'aria e viceversa nelle zone urbane.

Si nota però come la differenza tra i due andamenti è maggiore di giorno piuttosto che di notte in virtù del rilascio di calore da parte delle superfici che si ha di notte che permette di uguagliare la temperatura dell'aria e quella superficiale.

Da questo grafico è possibile notare come l'intensità dell'isola di calore superficiale (SUHI) intesa come la differenza tra la temperatura delle superfici urbane e quella delle superfici rurali è maggiore rispetto all'intensità dell'isola di calore atmosferica (AUHI).

Sempre secondo T.R. Oke è possibile studiare il fenomeno dell'isola di calore urbana oltre che ad una scala verticale anche ad una scala orizzontale che si può suddividere in:

- MICROSCALA (MICRO-SCALE)
- SCALA LOCALE (LOCAL-SCALE)
- MESOSCALA (MESO-SCALE)

Solitamente il fenomeno viene studiato a livello di microscala per poter mettere in evidenza l'interrelazione che sussiste tra Urban Heat Island, morfologia urbana, verde urbano e caratteristiche dei materiali utilizzati per le superfici urbane (in particolare per meabilità, albedo, capacità termica).

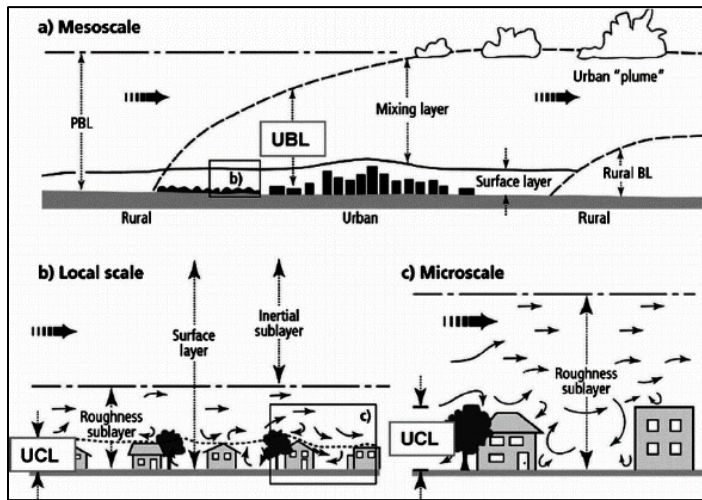


Figura 1.9 Schema delle tre possibili scale orizzontali e degli strati verticali individuabili in ciascuna scala (T.R. Oke "Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites" 2004)

1.2 Bilancio energetico Terra-Sole

1.2.1 Bilancio radiativo al suolo

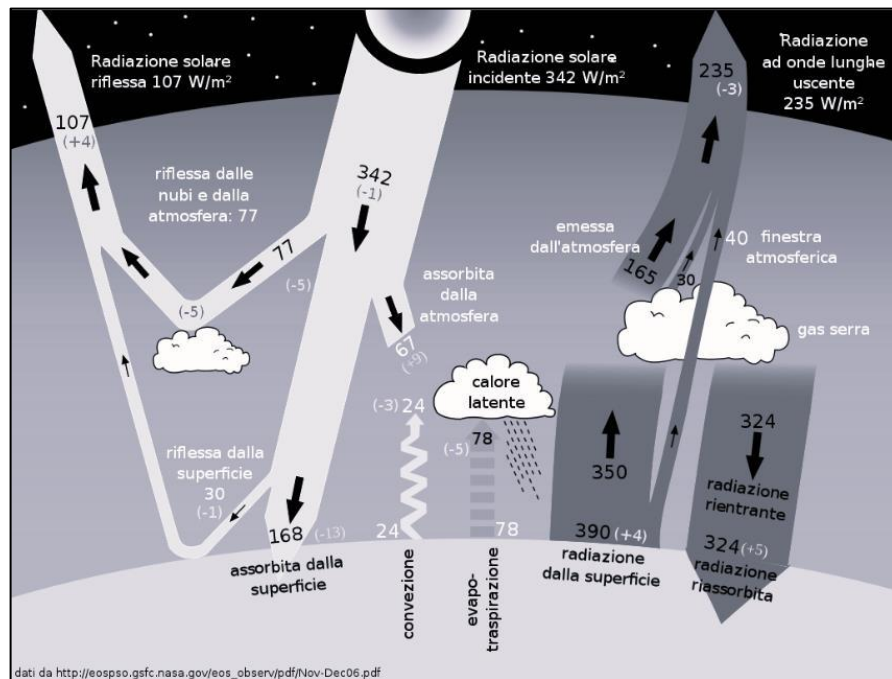


Figura 1.10 Flussi di energia in ingresso e in uscita dalla superficie terrestre (Effetto serra - Wikipedia)

Come rappresentato nella figura 1.8 la quantità di radiazione solare che irradia mediamente il sole a livello globale, nel corso dell'anno, è di circa 342 W/m^2 .

Una parte di questa radiazione (77 W/m^2) viene riflessa dalle nubi, dall'aerosol e dall'atmosfera; un'altra parte (30 W/m^2) viene riflessa dalla superficie terrestre in virtù della sua albedo: la somma di queste due frazioni di radiazione solare riflessa (107 W/m^2) costituisce l'albedo complessivo della terra ($A=0,39$).

Quindi la radiazione assorbita si ottiene dalla differenza tra la radiazione mediamente irradiata dal sole e la radiazione mediamente riflessa dalla superficie terrestre: $342-107=235 \text{ W/m}^2$ di cui 67 W/m^2 vengono assorbiti dall'atmosfera e 168 W/m^2 vengono assorbiti dalla superficie terrestre.

Ciò significa che la superficie terrestre assorbe effettivamente l'80% della radiazione solare in arrivo. Poi dei 168 W/m^2 circa 78 W/m^2 vengono trasferiti all'atmosfera come calore latente tramite il processo di evapotraspirazione mentre 24 W/m^2 come calore sensibile tramite le termiche.

Oltre alla radiazione che la terra emette in virtù della sua albedo c'è anche una certa quantità di radiazione che la terra emette in virtù della sua emissività (390 W/m^2) della quale solo una parte riesce ad uscire dall'atmosfera (235 W/m^2) mentre la restante (155 W/m^2), che prende il nome di "back radiation", viene intrappolata dai gas serra. Questa frazione di radiazione solare

che non riesce a fuoriuscire è la responsabile del riscaldamento della superficie terrestre e conseguentemente dell'atmosfera ("Global Warming").

Secondo quanto stabilito dalla Legge di Wien maggiore è la temperatura del corpo minore è la lunghezza d'onda di massima emissione.

$$(\lambda T)_{\max \text{ potenza}} = 2897.8 \quad (\mu\text{m} \cdot \text{K})$$

Quindi per il sole, che ha una temperatura di circa 5900 K, la lunghezza d'onda di massima emissione è $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$ corrispondente al visibile. Mentre la Terra avendo una temperatura di 255 K ha una lunghezza di massima emissione di $\lambda = 10 \mu\text{m}$ corrispondente all'infrarosso.

Ecco perché la radiazione in arrivo e in uscita dalla superficie terrestre si può suddividere in due tipi:

RADIAZIONE SHORT WAVE R_{SW} = radiazione con lunghezza d'onda corta ($\lambda = 0,23 - 0,7 \mu\text{m}$) e frequenza elevata (ultravioletto e visibile).

RADIAZIONE LONG WAVE R_{LW} = radiazione con lunghezza d'onda lunga ($\lambda = 0,7 - 4 \mu\text{m}$) e frequenza bassa (infrarosso).

Entrambe sono positive se sono assorbite dalla superficie terrestre mentre sono negative se vengono emesse dalla superficie terrestre.

La superficie terrestre riceve radiazioni solari (sia R_{SW} sia R_{LW}) solo durante il giorno mentre perde radiazioni (sia R_{SW} sia R_{LW}) sia di giorno sia di notte.

Per questo motivo il BILANCIO NETTO DELLE LONG WAVE, dato dalla differenza tra radiazioni long wave in ingresso e radiazioni long wave in uscita, è sempre negativo e almeno pari a 100 W/m^2 ; infatti, la terra emette R_{LW} (-) sia di giorno che di notte mentre assorbe R_{LW} (+) solo di giorno.

È opportuno specificare che la quantità di radiazione long wave emessa è variabile con la stagionalità sulla base di quanto stabilito dalla legge di Stefan Boltzman secondo la quale, fissato un certo valore di emissività, l'irraggiamento di una superficie cresce con la sua temperatura alla quarta:

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (\text{W}/\text{m}^2)$$

Invece la quantità di radiazione long wave incidente dipende sia dalla stagionalità sia dal tipo di massa attraversata.

Per quanto riguarda il BILANCIO NETTO DELLE SHORT WAVE è sempre positivo perché la terra emette una quantità quasi nulla di R_{SW} (-) mentre assorbe una grande quantità di R_{SW} (+).

Tenendo conto di questo il BILANCIO RADIATIVO NETTO AL SUOLO, che secondo quanto stabilito da Stull (1988) è dato dalla somma del bilancio netto delle long wave e dal bilancio netto delle short wave, è positivo.

Quindi la radiazione netta R_n è positiva cioè si ha un guadagno di energia da parte della superficie terrestre che si riscalda e riscalda l'atmosfera.

$$R_n = R_{\text{SW incidente}}^{(+)} - R_{\text{SW riflessa}}^{(-)} + R_{\text{LW incidente}}^{(+)} - R_{\text{LW riflessa}}^{(-)}$$

La differenza tra il bilancio radiativo al suolo in zone urbane e in zone rurali è alla base dello sviluppo dell'isola di calore urbana. Questa differenza è dovuta primariamente alle diverse caratteristiche radiative che hanno le superfici urbane rispetto a quelle rurali e in particolare alla capacità delle prime di immagazzinare una maggiore quantità di calore rispetto alle seconde. Di conseguenza le temperature delle superfici cittadine risultano maggiori rispetto a quelle delle campagne questo comporta una maggiore emissione di radiazioni long wave da parte delle prime rispetto alle seconde.

Quindi il bilancio radiativo netto di giorno contiene sia le componenti delle short wave sia quelle delle long wave ed è minore nelle zone urbane rispetto alle zone rurali mentre di notte il bilancio delle short wave è nullo quindi il bilancio radiativo netto presenta solo le componenti delle long wave che dipendono dalla temperatura delle superfici. Di conseguenza di notte il bilancio radiativo netto sarà negativo e tanto maggiore dove la temperatura delle superfici è maggiore cioè nelle zone urbane dove si ha un rilascio di radiazioni long wave da parte delle stesse che comporta un innalzamento della temperatura dell'aria. Questo spiega come mai l'isola di calore urbana è massima nei centri cittadini e nelle ore notturne.

È importante sottolineare che non tutta la radiazione solare (ultravioletto, visibile, infrarosso) che viene irradiata dal sole arriva alla superficie terrestre perché essa viene in parte filtrata dall'atmosfera in quattro modi:

- riflessione da parte delle nubi
- riflessione da parte della superficie terrestre
- filtraggio della radiazione solare ad onda lunga (ultravioletta) da parte di ozonofera e ionosfera
- estinzione della radiazione cioè diminuzione dell'intensità ad opera dei costituenti dell'atmosfera.

Per comprendere il meccanismo della riflessione bisogna introdurre il concetto di albedo. L'albedo di una superficie è la frazione di radiazione solare incidente che viene riflessa in tutte le direzioni. Esso indica dunque il potere riflettente di una superficie.

Riflessione da parte delle nubi

La riflessione da parte delle nubi è ad opera soprattutto delle nubi più coprenti (cirri e cirrostrati) che hanno un'albedo compreso tra 0.83 e 0.80 ciò significa che riflettono più dell'80% della radiazione solare.

Nube	Albedo
Cirri	0.83
Cirrostrati	0.80
Alto cumuli	0.50
Altostrati	0.41
Stratocumuli	0.34
Strati	0.25
Nembostrati	0.18
Nebbia	0.17

Tabella 1.2 Valori di albedo dei principali tipi di nubi (Giorgio Passerini 2021/2022)

Riflessione da parte della superficie terrestre

La terra ha un'albedo relativamente elevato rispetto ad altri pianeti: $A_{terra}=0,39$ cioè la terra riflette il 39% della radiazione solare incidente al contrario della Luna che ha un'albedo molto più basso: $A_{luna}=0,07$.

Le varie tipologie di superfici che costituiscono la superficie terrestre possono avere dei valori di albedo estremamente diversi che vengono riassunti nella seguente tabella:

Superficie	Albedo
Neve fresca	0.95 - 0.80
Neve vecchia	0.70 - 0.42
Acqua stagnante con sole a 5°	0.59
Acqua stagnante con sole a 10°	0.35
Acqua stagnante con sole a 20°	0.13
Acqua stagnante con sole a 30°	0.06
Acqua stagnante con sole a 40°-90°	0.02
Oceano	0.07 - 0.02
Roccia	0.25 - 0.15
Sabbia chiara	0.45 - 0.25
Sabbia grigia	0.25 - 0.10
Terreno sabbioso asciutto	0.45 - 0.25
Terreno Argilloso asciutto	0.35 - 0.20
Terreno Torboso	0.15 - 0.05
Terreno Coltivato	0.14 - 0.07
Tappeto erboso irrigato	0.37 - 0.14
Tappeto erboso non irrigato	0.25 - 0.15
Foresta	0.20 - 0.06

Tabella 1.3 Valori di albedo delle diverse superfici (Giorgio Passerini 2021/2022)

Estinzione della radiazione

L'estinzione della radiazione è uno dei quattro meccanismi con cui viene filtrata la radiazione solare dall'atmosfera e dipende dai suoi elementi costituenti:

<i>Elemento</i>	<i>Formula</i>	<i>Volume-%</i>	<i>Assorbimento</i>
Azoto	N ₂	78.08	UV/IR
Ossigeno	O ₂	20.94	UV/IR
Argon	Ar	0.934	
An. Carbonica	CO ₂	0.0330	IR
Neon	Ne	0.0020	
Elio	He	0.0005	
Metano	CH ₄	0.00015	IR
Cripton	Kr	0.00011	
Idrogeno	H ₂	0.00005	
Prot.dj. Azoto	N ₂ O	0.00005	
Xenon	Xe	0.00001	
Ozono	O ₃	tracce	UV alta energia

Tabella 1.4 Composizione chimica media dell'atmosfera in condizioni normali (Giorgio Passerini 2021/2022)

Ogni elemento chimico che compone l'atmosfera ha una capacità di assorbimento diversa quindi ciascuno di essi assorbe un diverso tipo di radiazione.

L'atmosfera è costituita prevalentemente da azoto (78%) e ossigeno (21%) e il terzo elemento presente in discrete quantità è l'argon (1%); infine, è presente una piccolissima quantità di anidride carbonica, di metano e alcune tracce di ozono.

Il fatto che l'anidride carbonica e il metano sono originariamente presenti in atmosfera in piccolissime quantità non deve trarre in inganno dato che la quantità di entrambi può essere facilmente incrementata (es. tramite l'utilizzo smodato di combustibili fossili). Questo può rappresentare un problema in quanto CO₂ e CH₄ hanno un'elevata capacità di assorbimento dei raggi infrarossi IR, quindi, vengono considerati i maggiori responsabili dell'effetto serra e in quanto tali vengono chiamati gas serra.

N₂ e O₂ assorbono in maniera analoga sia i raggi ultravioletti (UV) sia i raggi infrarossi (IR).

Infine, l'O₃ (stratosferico) assorbe i raggi ultravioletti UV ad alta energia.

Da questa tabella è facile capire come l'incremento in concentrazione di alcuni elementi (CO₂ e CH₄) causato dalle attività umane, rappresenti una forzante radiativa che altera il bilancio energetico Terra-Sole in quanto comporta una quantità di radiazione solare in ingresso maggiore di quella in uscita.

Un altro tipo di forzante radiativa che ha il medesimo effetto è la riduzione dell'aerosol atmosferico. La prima forzante radiativa innesca un fenomeno che prende il nome di effetto serra ed è alla base del Global Warming e dei cambiamenti climatici attualmente in atto.

Nel 2014 l'Ipcc ha introdotto quattro scenari RCP (Representative Concentration Pathways) che permettono di prevedere, in base alla concentrazione dei gas climalteranti e degli aerosol, quale sarà lo scenario climatico futuro verso cui si potrà tendere.

I quattro scenari dipendono fortemente dall'andamento delle emissioni umane a loro volta connesse con le tecniche di mitigazione al cambiamento climatico messe in atto dal Paese in esame.

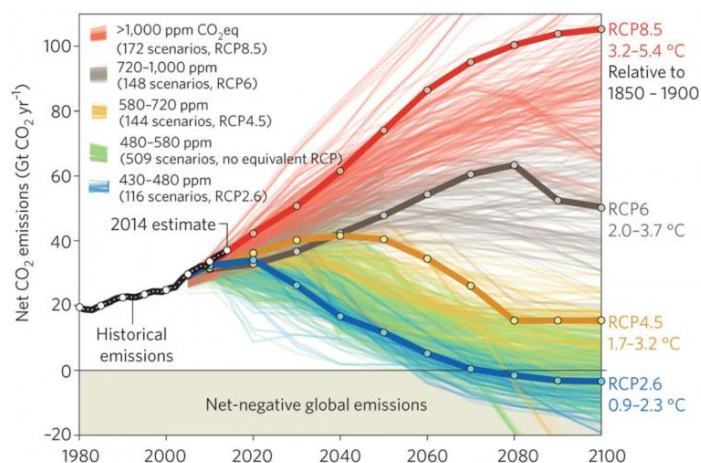


Figura 1.11 Andamento delle emissioni di anidride carbonica e aumento di temperatura al 2100 (rispetto al periodo 1850-1900) associati a ciascun RCP. (Fuss et al. "Betting on negative emissions" 2014)

L'RCP 2.6 è lo scenario che si avrebbe se venisse rispettato quanto stabilito dall'accordo di Parigi. Secondo questo scenario tra il 2081 e il 2100 si riuscirà a mantenere l'aumento della temperatura globale sotto i 2°C rispetto all'epoca preindustriale (1850-1900)

L'RCP 4.5 è lo scenario che si avrebbe applicando almeno parzialmente gli obblighi previsti dal Protocollo di Kyoto (1997). In questo caso l'incremento di temperatura è variabile tra 1.7°C e 3.2°C. Picco delle emissioni previsto nel 2040

L'RCP 6 si riferisce a uno scenario in cui vengono implementate solo alcune misure a livello nazionale. Incremento di temperatura: 2.0°C e 3.7°C. Picco delle emissioni previsto nel 2080

L'RCP 8.5 è lo scenario che si avrebbe se non venisse applicata alcuna tecnica di contenimento del cambiamento climatico quindi questo scenario è caratterizzato da una crescita incontrollata delle emissioni.

1.2.2 Bilancio termico al suolo

Dal bilancio radiativo al suolo si ottiene una radiazione netta R_n positiva, indicativa della quantità di energia che viene assorbita per m^2 dalla superficie terrestre, che una volta assorbita si trasforma in calore netto assorbito Q_{net} tramite la seguente formula:

$$Q_{net} = 4,186 \cdot h \cdot R_{net} \quad (\text{cal/s m}^2)$$

h = spessore della superficie risaldata

Questa formula permette di concludere che il bilancio radiativo al suolo è strettamente connesso al bilancio termico al suolo.

Il calore netto Q_{net} assorbito può:

-essere immagazzinato e diventare energia interna portando ad un incremento di temperatura della superficie:

$$Q_{storage} = C \cdot \frac{dT}{dt}$$

C=capacità termica del corpo (variabile a seconda del contenuto di acqua)

Nel caso del suolo il valore di Qstorage è limitato infatti il suolo non si riscalda tanto perché comincia subito a trasmettere calore per conduzione e convezione

-essere trasmesso in profondità per conduzione portando ad un incremento di temperatura degli strati più profondi:

$$Q_{cond} = -k \cdot \frac{\partial T}{\partial z}$$

k= conducibilità termica (dipende dal contenuto di acqua)

-essere trasmesso in profondità per convezione nel caso di superfici liquide

$$Q_{conv} = h \cdot (T_s - T_w)$$

h= coefficiente di scambio termico convettivo

-essere trasmesso per convezione all'aria sovrastante:

$$Q_{conv} = h \cdot (T_s - T_a)$$

h= coefficiente di scambio termico convettivo

-essere utilizzato per l'evapotraspirazione:

$$Q_{evap} = \lambda \cdot ET$$

λ = calore latente di evaporazione dell'acqua (4186 J/kg K); ET=evapotraspirazione

In definitiva:

$$Q_{net} = Q_{storage} + Q_{cond} + Q_{conv} + Q_{evap}$$

Bisogna specificare che non tutta la radiazione solare incidente viene assorbita dalla superficie terrestre, infatti, una qualsiasi superficie si comporta rispetto alla irradiazione G, intesa come radiazione globale incidente su una superficie per unità di area e per unità di tempo, nel seguente modo:

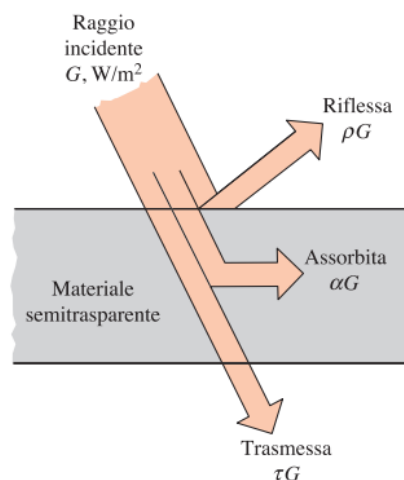


Figura 1.12 Assorbimento, riflessione e trasmissione della radiazione incidente da parte di un materiale semitrasparente. ("Termodinamica e trasmissione del calore" Yunus A. Çengel)

-una parte della radiazione viene riflessa, indicata dal coefficiente di riflessione ρ

$$\rho = \frac{\text{radiazione riflessa}}{\text{radiazione incidente}} = \frac{G_{rif}}{G} \quad 0 \leq \rho \leq 1$$

-una parte della radiazione viene assorbita, indicata dal coefficiente di assorbimento α

$$\alpha = \frac{\text{radiazione assorbita}}{\text{radiazione incidente}} = \frac{G_{ass}}{G} \quad 0 \leq \alpha \leq 1$$

-una parte della radiazione viene trasmessa, indicata dal coefficiente di trasmissione τ

$$\tau = \frac{\text{radiazione trasmessa}}{\text{radiazione incidente}} = \frac{G_{tr}}{G} \quad 0 \leq \tau \leq 1$$

Per il primo principio della termodinamica la somma della frazione di radiazione assorbita, di quella riflessa e di quella trasmessa deve essere uguale alla radiazione incidente G quindi:

$$G_{rif} + G_{ass} + G_{tr} = G$$

Che si può scrivere in termini di coefficienti come:

$$\rho + \alpha + \tau = 1$$

Che nel caso di superfici opache, per le quali $\tau=0$ diventa:

$$\rho + \alpha = 1$$

Quindi nel caso di superficie opaca è facile determinare entrambi i coefficienti misurando solo uno di essi.

Ipotizzando di trascurare la trasmissione del calore nel terreno il bilancio energetico (energia entrante=energia uscente) della generica superficie è dato da:

$$(1 - \alpha)G = h \cdot (T_s - T_a) + \varepsilon \cdot \sigma (T_s^4 - T_{sky}^4) + \lambda ET$$

G = radiazione globale incidente

α =albedo della superficie

$(1-\alpha)G$ = frazione della radiazione solare globale incidente G che viene assorbita dalla superficie terrestre anche detta radiazione netta R_n

$h(T_s - T_a)$ = flusso di calore sensibile perso per convezione

$\varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{sky}^4)$ = flusso di calore sensibile perso per irraggiamento

λET = flusso di calore latente perso per evapotraspirazione

Nel caso di ambiente urbano nel primo membro del bilancio energetico va aggiunta alla radiazione netta $(1-\alpha)G$ il calore antropogenico Q_f mentre al secondo membro va aggiunto il flusso di energia legato ai processi metabolici M .

Quindi il bilancio energetico diventa:

$$(1 - \alpha)G + Q_f = h \cdot (T_s - T_a) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_{sky}^4) + \lambda ET + M$$

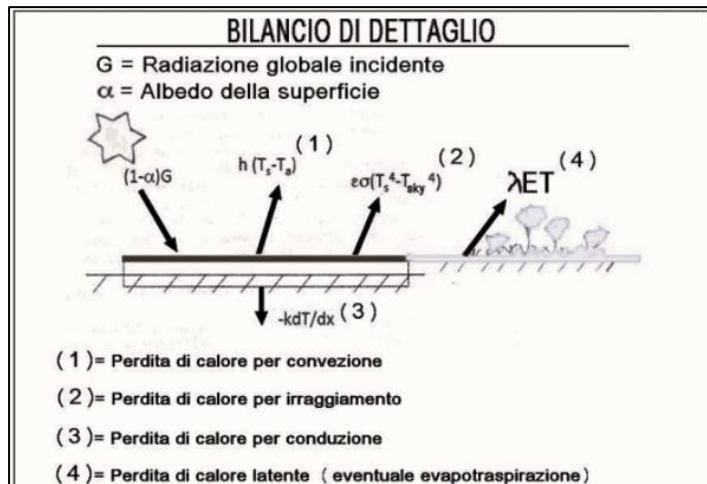


Figura 1.13 Bilancio energetico superficiale (dicatechpoliba.it)

1.3 Evapotraspirazione

Dal bilancio energetico superficiale si è visto che la radiazione solare incidente al suolo viene in parte riflessa e in parte assorbita.

La radiazione solare che viene assorbita entra nel bilancio radiativo al suolo per poi essere in gran parte (80%) restituita all'atmosfera sotto forma di calore latente tramite l'EVAPOTRASPIRAZIONE ET, un fenomeno caratterizzato dall'effetto congiunto di EVAPORAZIONE: processo tramite il quale viene ceduta acqua sotto forma di vapore all'atmosfera dalla superficie del terreno e dalle superfici liquide (laghi, fiumi, mari ecc...) e di TRASPIRAZIONE: processo tramite il quale viene ceduta acqua sotto forma di vapore all'atmosfera dagli organismi viventi (vegetazioni (piante e erba), animali, esseri umani). L'unità di misura dell'evapotraspirazione è il millimetro (mm) o il m^3/ha .

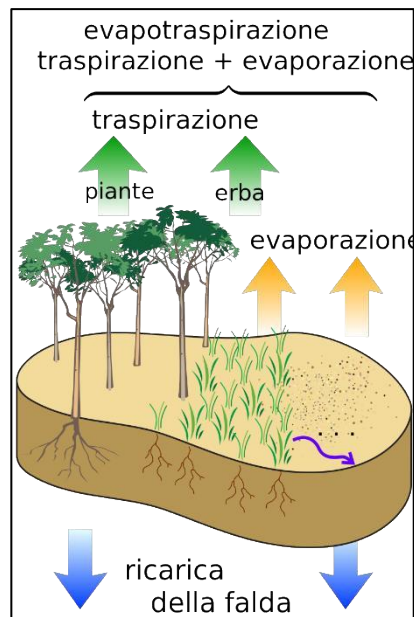


Figura 1.14 Schema di evapotraspirazione (<https://it.wikipedia.org>)

L'evapotraspirazione è responsabile dei moti ascendenti che insieme ai moti discendenti (piogge) e i moti orizzontali (deflusso dei fiumi) costituiscono il CICLO DELL'ACQUA.

I fattori che influenzano l'evapotraspirazione sono:

-la tipologia di terreno: è favorita da terreni grossolani e umidi

-temperatura dell'aria: è favorita da temperature elevate in quanto è un processo che per poter avvenire assorbe calore dall'ambiente. Inoltre, le temperature elevate comportano una diminuzione dell'umidità relativa dell'aria che a sua volta favorisce l'evaporazione.

-umidità relativa dell'aria: è favorita da una bassa umidità relativa (aria secca). Al contrario un'aria satura non consentirebbe un'adeguata evapotraspirazione perché l'acqua evapora ma subito dopo precipita.

-vento: è favorita da un vento caldo e asciutto (al contrario i venti freddi e umidi la limitano) dotato di velocità elevata che crea turbolenza

-pressione atmosferica

-radiazione solare: è favorita da una maggiore radiazione solare

-sviluppo dell'apparato radicale delle piante: nei terreni umidi l'apparato radicale deve essere espanso in superficie mentre in quelli asciutti deve essere caratterizzato da radici profonde

-superficie degli organi erbacei, definita dall'indice di area fogliare (LAI leaf area index): l'evapotraspirazione è favorita da un LAI elevato

-irrigazione: quanto è maggiore quanto più è favorita l'evapotraspirazione

-concimazione: incrementa il LAI quindi favorisce l'evapotraspirazione

-sistemi protettivi (frangivento e pacciamatura) riducono la velocità del vento e la superficie di contatto terreno-atmosfera quindi riducono l'evapotraspirazione

1.3.1 Metodi di calcolo dell'evapotraspirazione

L'evapotraspirazione può essere misurata o stimata. Si parla di:

-metodo diretto di misura basato sul bilancio idrico del suolo o effettuato mediante l'utilizzo di lisimetri a pesata

-metodo indiretto di stima basato sull'utilizzo di modelli empirici che tengono conto delle variazioni di alcuni parametri climatici.

METODO DIRETTO:

L'equazione del bilancio idrico a cui far riferimento assume la seguente forma:

$$ET_a = I + P + A_f - D - R \pm \Delta W$$

ET_a= evapotraspirazione

I=irrigazione

P=precipitazioni

A_f=apporti di falda

D=percolazione

R=ruscellamento

ΔW= variazione contenuto idrico suolo

METODI INDIRETTI:

Dato che l'evapotraspirazione è estremamente variabile e influenzabile dai fattori precedentemente elencati, per la stima mediante i metodi indiretti viene introdotto il concetto di EVAPOTRASPIRAZIONE POTENZIALE DI RIFERIMENTO ET₀.

L'evapotraspirazione potenziale si riferisce al quantitativo massimo di acqua che può essere perso nell'unità di tempo per evaporazione e traspirazione da una superficie coperta da una coltura ideale (prato di graminacea) che presenta le seguenti caratteristiche:

- contenuto ottimale di umidità;
- superficie regolare, livellata e di grande dimensione;
- condizioni ottimali di salute e nutrizione;
- assenza di diradamenti;
- altezza costante di 10–15 cm.

In questo modo si vanno ad eliminare le variabili tipiche dell'evaporazione pur permanendo ancora quelle relative al clima (radiazione solare, temperatura, vento e umidità relativa).

Per questo motivo ET₀ è il parametro utilizzato per stimare il quantitativo di acqua evaporato da un qualsiasi altro tipo di coltura (diverso dal prato di graminacea), qualsiasi

siano le condizioni ambientali. Per far questo si utilizzano degli opportuni coefficienti correttivi (K_c e/o K_s).

Dalla moltiplicazione dell'evapotraspirazione potenziale ET_0 con il coefficiente colturale K_c si ottiene l'EVAPOTRASPIRAZIONE EFFETTIVA ET_c cioè il quantitativo di acqua perso nell'unità di tempo per evaporazione e traspirazione da una coltura generica nelle condizioni standard.

Invece dalla moltiplicazione dell'evapotraspirazione potenziale ET_0 con il coefficiente colturale aggiustato K_c adjusted e con il coefficiente di deficit idrico K_s si ottiene l'EVAPOTRASPIRAZIONE EFFETTIVA AGGIUSTATA ET_c adj con il quale si esprime il quantitativo di acqua perso nell'unità di tempo per evaporazione e traspirazione da una coltura generica nelle condizioni non standard.

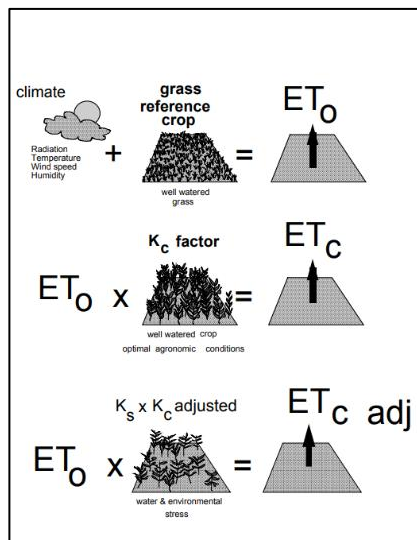


Figura 1.15 Confronto tra evapotraspirazione potenziale di riferimento ET_0 , evapotraspirazione effettiva in condizioni standard ET_c ed evapotraspirazione effettiva in condizioni non standard ET_c adj (Richard G. Allen, Luis S. Pereira, Dirk Raes, Martin Smith. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma, 1998)

I metodi attualmente utilizzati per la stima dell'evapotraspirazione sono i metodi proposti dalla FAO che permettono di stimare l'EVAPOTRASPIRAZIONE POTENZIALE DI RIFERIMENTO STANDARD (ET_0).

Il metodo indiretto maggiormente conosciuto è il METODO DI TURC con il quale si calcola ET_0 s (mm/mese) utilizzando la correlazione esistente tra quest'ultima, la temperatura media e la radiazione globale incidente media.

$$ET_0s = \left(\frac{C \cdot T}{T + 15} \right) \cdot (R_g + 50)$$

T = temperatura media del mese considerato ($^{\circ}C$);

R_g = Radiazione globale media del mese considerato (cal/cm d)

C = coefficiente pari a 0.37 per febbraio e 0.40 per i restanti mesi

Per completezza risulta opportuno citare, gli altri metodi indiretti che possono essere usati per la stima dell'evapotraspirazione: il METODO DI THORNTHWAITE che lega ET_{0s} (mm/mese) alla temperatura media mensile; il METODO DI BLANEY-CRIDDLE che lega ET_{0s} (mm/mese) alla temperatura media mensile e al numero di ore di insolazione; il METODO DI HARGREAVES con il quale si calcola ET_{0s} di reference crop relativo ad uno specifico giorno considerando l'escursione termica giornaliera, la temperatura media giornaliera e l'altezza di evaporazione equivalente alla radiazione astronomica per il sito e il giorno di interesse; il METODO FAO PENMAN-MONTEITH che è il metodo più complesso ma anche quello più preciso secondo il quale le variabili climatiche legate alla ET_{0s} sono: apporto energetico, trasporto turbolento dell'aria e passaggio di vapore dagli stomi all'atmosfera (quantificabile mediante la resistenza degli stomi e la resistenza aerodinamica).

In ultimo, ma non per importanza, il METODO EVAPORIMETRICO un metodo sperimentale che lega, tramite un coefficiente di riduzione K_p, ET_{0s} con la quantità d'acqua evaporata, nel periodo di osservazione, da un evaporimetro.

1.3.2 Rapporto di Bowen

Per quantificare gli scambi che avvengono, all'interno dello strato limite planetario, tra le superfici continentali (traspirazione) o oceaniche (evaporazione) e l'atmosfera si utilizza un parametro detto rapporto di Bowen indicato come il rapporto tra il calore sensibile e il calore latente

$$\beta = \frac{Q_h}{Q_e}$$

Il calore sensibile Q_h è una forma di energia sensibile che il professore Giorgio Passerini docente di fisica tecnica ambientale all'Università Politecnica delle Marche, definisce come “la parte di energia interna di un sistema legata all'energia cinetica delle molecole” ed è quel calore che viene scambiato tra due corpi a differenti temperature e che comporta una diminuzione della differenza di temperatura; tale calore continua ad essere scambiato finché i due corpi non raggiungono l'equilibrio termico.

Invece il calore latente Q_e, sempre sulla base della definizione fornita dal professore Giorgio Passerini, è “la parte di energia interna di un sistema legata alle forze intermolecolari e quindi alla fase del sistema” ed è il calore necessario a far avvenire un passaggio di stato senza che vari la temperatura.

Nel caso specifico dell'evaporazione si parla di calore latente di vaporizzazione, cioè la quantità di energia necessaria a vaporizzare 1 grammo di acqua, quantificabile tramite strumenti che permettono di misurare la concentrazione di vapore in atmosfera: tanto maggiore è la concentrazione di vapore tanto più è alto il calore latente di vaporizzazione che rappresenta il calore sottratto all'ambiente durante l'evaporazione.

Sperimentalmente si è osservato che:

-in suoli aridi o semiaridi, quindi poveri di umidità, si registrano valori elevati di calore sensibile Q_h e ciò comporta anche valori di β elevati (circa 5);

-in suoli molto umidi si registrano elevati valori di calore latente Q_e e ciò determina valori di β bassi (0.5 per terreni erbosi in condizioni normali e per foreste; 0.2 per terreni erbosi irrigati).

Per questo nelle aree urbane, caratterizzate da terreni impermeabili e poveri di umidità, β è più alto rispetto alle aree rurali perché la scarsa presenza di umidità nei terreni delle città va a discapito dell'evapotraspirazione e quindi del flusso di calore latente Q_e mentre favorisce il flusso di calore sensibile Q_h in virtù delle temperature più elevate. Al contrario, incrementare la permeabilità dei terreni e la vegetazione consente di trasformare parte del flusso di calore sensibile Q_h in calore latente Q_e e questo comporta un minor aumento della temperatura.

Il RAPPORTO DI BOWEN DI EQUILIBRIO β_E è il valore massimo a cui può tendere β che viene raggiunto quando l'atmosfera è satura (elevata umidità relativa) la quale impedisce l'evaporazione.

β_E è inversamente proporzionale alla temperatura, quindi è minore sopra gli oceani equatoriali dove Q_e è superiore mentre è maggiore sopra gli oceani polari dove Q_e è inferiore.

copertura del terreno	valori tipici del rapporto di Bowen
regioni semi-aride	5
terreni erbosi	0.5
foreste	0.5
terreni erbosi irrigati	0.2
mare	0.1

Tabella 1.5 Valori tipici del rapporto di Bowen per diverse coperture del terreno ("Analisi del comportamento energetico di un fabbricato-tipo in assenza/presenza di tetto/parete verde per ottimizzare l'efficienza energetica degli edifici in area urbana" Fabio Fantozzi, Carlo Bibbiani, Caterina Gargari ENEA)

1.4 Cause dell'isola di calore urbana

Da sempre l'isola di calore urbana è stata ampiamente analizzata tramite studi e ricerche approfondite che hanno permesso di individuare le molteplici cause del fenomeno.

In virtù di questa pluralità di cause l'isola di calore urbana è considerata una problematica di difficile risoluzione.

Per snellire la trattazione alcuni studiosi, tra cui Oke T.R. (1987), Akabari et al. (2001) e Santamouris et al. (2007), hanno pensato di raggruppare le cause dell'isola di calore urbana nelle seguenti categorie:

1.4.1 Proprietà termiche e radiative dei materiali usati per le superfici urbane

L'aumento esponenziale del fenomeno dell'isola di calore urbana che si è registrato negli ultimi anni è strettamente connesso alla sempre maggiore urbanizzazione, la quale a sua volta va di pari passo con un'importante crescita economica e un numero sempre più elevato di persone che dalle zone rurali migrano verso quelle urbane.

L'urbanizzazione ha portato ad una graduale sostituzione delle aree verdi precedentemente presenti con strade, marciapiedi, piazze, parcheggi ed edifici i cui materiali costituenti hanno delle proprietà termiche e radiative che, secondo diversi studi come quello condotta da Montavez et al., a Granada (2000), ne influenzano il comportamento nei confronti della radiazione solare incidente.

Il parametro che maggiormente segna la differenza di comportamento tra le superfici urbane e quelle rurali è la riflettanza, detta anche albedo cioè la frazione di radiazione solare incidente che viene riflessa in tutte le direzioni.

Tanto maggiore è l'albedo tanto più la superficie tende a riflettere la luce solare incidente e di conseguenza ad immagazzinarne poca. Questo è quello che avviene con le superfici rurali, le quali hanno un'albedo variabile in un range di 0,25-0,30.

Al contrario un'albedo basso (0,10-0,20), tipico delle superfici urbane, comporta un elevato immagazzinamento di radiazione solare con conseguente incremento della temperatura superficiale e quindi una maggiore emissione di radiazione long wave (infrarossa) dalle stesse.

Da questa osservazione è facile capire come le superfici tipicamente usate nelle città possano modificare sostanzialmente il bilancio radiativo al suolo, ecco perché risulta importante sostituirle con superfici altamente riflettenti.

Altre proprietà radiative delle superfici da tenere in considerazione, oltre l'albedo, sono:

l'emissività ε definita come il rapporto tra la radiazione emessa dalla superficie di un generico corpo e quella emessa dalla superficie di un corpo nero alla stessa temperatura quindi è una misura dello scostamento del potere emissivo di un corpo reale rispetto a quello di un corpo nero. Varia tra zero e uno ($0 \leq \varepsilon \leq 1$) ed è uguale a 1 solo per un corpo nero. Quindi l'emissività esprime quanto un materiale sia in grado di irraggiare energia ad una determinata temperatura.

L'emissività di una superficie reale non è costante ma varia con la temperatura della superficie, con la lunghezza d'onda e con l'angolo di incidenza della radiazione ma potrebbe essere espressa solo in funzione della temperatura e della lunghezza d'onda e in tal caso si parla di emissività emisferica monocromatica ε_λ :

$$\varepsilon_\lambda (\lambda, T) = \frac{E_\lambda (\lambda, T)}{E_{n\lambda} (\lambda, T)}$$

Invece l'emissività emisferica totale ε è in funzione solo della temperatura:

$$\varepsilon(T) = \frac{E(T)}{E_n(T)}$$

Anche i coefficienti di assorbimento α , di riflessione ρ e di trasmissione τ , di cui si è precedentemente parlato nel capitolo relativo al bilancio energetico terra-Sole, sono considerati delle proprietà radiative dei materiali.

In ultimo le proprietà termiche che bisogna tenere in considerazione per capire il comportamento dei materiali sono:

-il calore specifico definito come “l'energia richiesta per innalzare di 1 °C (o di 1 K) la temperatura della massa unitaria di una sostanza.” (Yunus A. Çengel 2013)

-la capacità termica che esprime “il livello di accumulo termico di un materiale per unità di volume” (Yunus A. Çengel, 2013)

$$C = \rho c_p \quad (J/m^3 \times ^\circ C)$$

ρ =densità del materiale

c_p =calore specifico a pressione costante

La quantità di calore che viene immagazzinata dalle superfici urbane è circa il doppio di quello immagazzinato dalle superfici rurali.

-la diffusività termica definita come “il rapporto tra il calore trasmesso per conduzione e il calore accumulato per unità di volume” (Yunus A. Çengel, 2013)

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad (m^2/s)$$

λ =conducibilità termica del materiale

ρ =densità del materiale

c_p =calore specifico a pressione costante

-la conducibilità termica λ definita come “la potenza termica che si trasmette attraverso uno spessore unitario del materiale per unità di superficie e per differenza di temperatura unitaria” (Yunus A. Çencel, 2013). L’unità di misura della conducibilità termica è in W/m K.

- L’inerzia termica è la “velocità di variazione della temperatura di un materiale in risposta ad una variazione di temperatura esterna e quindi della variazione del flusso di calore attraverso la superficie del materiale” (T.R. Oke 1987). È definita come $\mu = (\lambda C)^{1/2}$ e l’unità di misura è il W/s K.

I materiali con una bassa inerzia termica, tipici delle zone rurali, tendono a variare facilmente la temperatura in seguito all’attraversamento di un flusso di calore, al contrario i materiali utilizzati per l’edilizia urbana hanno un’elevata inerzia termica per la loro elevata conducibilità termica λ e capacità termica C questo significa che ricevono facilmente calore pur subendo moderate variazioni di temperatura superficiale.

Material (Dry State)	Remarks	Density (kg m ⁻³ × 10 ³)	Specific Heat (J kg ⁻¹ K ⁻¹ × 10 ³)	Heat Capacity (J m ⁻³ K ⁻¹ × 10 ⁶)	Thermal Conductivity (W m ⁻¹ K ⁻¹)	Thermal Diffusivity (m ² s ⁻¹ × 10 ⁻⁶)	Thermal Admittance (J m ⁻² s ^{-1/2})
Asphalt		2.11	0.92	1.94	0.75	0.38	1205
Concrete	Aerated	0.32	0.88	0.28	0.08	0.29	150
	Dense	2.40	0.88	2.11	1.51	0.72	1785
Stone	Av.	2.68	0.84	2.25	2.19	4.93	2220
Brick	Av.	1.83	0.75	1.37	0.83	0.61	1065
Clay tiles		1.92	0.92	1.77	0.84	0.47	1220

Tabella 1.6 Proprietà termiche dei materiali utilizzati negli edifici e nelle costruzioni

Quindi si può concludere che essendo le superfici urbane, costituite principalmente da cemento e asfalto i quali sono materiali poco riflettenti nei confronti della radiazione solare incidente in virtù della loro bassa albedo (cemento: 0,20-0,40; asfalto: 0,05-0,15), riescono ad assorbire molta radiazione solare incidente e, in virtù della loro elevata capacità termica C, ad immagazzinare molto calore durante il giorno che viene poi rilasciato gradualmente di notte sotto forma di radiazione ad onda lunga (infrarosso). Questo lento rilascio è dovuto a valori bassi dello SVF oltre che alla presenza di canyon urbani che spesso rendono il raffreddamento inefficace.

Oltre alle proprietà termiche e radiative, anche le colorazioni scure e l’impermeabilità delle superfici urbane concorrono alla maggiore temperatura epidermica delle stesse e dell’aria circostante.

Come stabilito da John M. Sharp, Jr. nel suo documento “The impacts of urbanization on groundwater systems and recharge” (2010) l’impermeabilità delle superfici è alla base non solo di una scarsa evaporazione in quanto non permette l’infiltrazione di acqua nel sottosuolo ma anche del fenomeno del run off in quanto l’acqua, non potendosi infiltrare, è costretta a scorrere superficialmente.

1.4.2 Calore antropogenico

Per calore antropogenico si intende tutto il calore derivante da attività umane quali traffico veicolare, attività industriali, impianti di condizionamento o riscaldamento e altri utilizzi di energia in ambito edilizio che oltre a rilasciare calore sensibile in atmosfera, aumentano la concentrazione dei gas serra responsabili dell'intrappolamento delle radiazioni ad onda lunga (infrarosse) in uscita e di conseguenza dell'incremento del fenomeno dell'isola di calore urbana e a più ampia scala del riscaldamento globale. Anche il calore generato dal metabolismo umano e animale rientra nel calore antropogenico.

Secondo Salamanca et al. ("Anthropogenic Heating of the Urban Environment due to Air Conditioning" 2013) in ambienti urbani semiaridi il condizionamento dell'aria rappresenta più del 50% del consumo totale di elettricità e può raggiungere il 65% durante le ore di punta delle giornate estive.

H. Akbari, M. Pomerantz e H. Taha ("Cool Surfaces and Shade Trees to Reduce Energy Use and Improve Air Quality in Urban Areas" 2001) hanno dimostrato che generalmente la domanda di elettricità nelle città aumenta del 2–4% per ogni 1°C di aumento della temperatura. Da questa assunzione è facile capire che il calore antropogenico è insieme causa ed effetto dell'isola di calore urbana in quanto un aumento del fenomeno porta in estate ad una maggiore richiesta di energia per il raffrescamento, la quale a sua volta comporta un'elevata quantità di calore sensibile rilasciato nell'aria ambiente con un conseguente impatto sul bilancio energetico superficiale e quindi sulla temperatura in città.

Inoltre F. Salamanca, M. Georgescu, A. Mahalov, M. Moustaoi, M. Wang nell'articolo "Anthropogenic heating of the urban environment due to air conditioning" pongono l'attenzione su quanto il riscaldamento antropogenico dovuto ai sistemi di climatizzazione vari durante l'arco della giornata. Questa variabilità è dovuta all'altezza dello strato limite planetario che risulta avere un'importanza preponderante rispetto alla temperatura esterna; a causa di ciò l'effetto dei sistemi di climatizzazione risulta essere più importante durante la notte quando l'altezza dello strato limite urbano è limitata a pochi metri mentre è trascurabile durante il giorno quando l'altezza dello strato limite urbano può raggiungere diversi chilometri.

Ovviamente i carichi interni cittadini non sono i principali responsabili dell'isola di calore urbana ma una loro riduzione è fondamentale per mitigare gli effetti negativi dell'isola di calore urbana.

1.4.3 Morfologia del centro urbano

Come stabilito da Landsberg nel 1981, la morfologia urbana intesa come la disposizione, l'orientamento e l'altezza degli edifici presenti al suo interno, è tra le principali cause dello sviluppo dell'isola di calore urbana in quanto incide sul regime di circolazione dei venti e sui percorsi delle radiazioni comportando una variazione del bilancio energetico urbano. La modifica del profilo del vento dovuta alla presenza degli edifici e alla loro disposizione reciproca è anche alla base dello sviluppo dell'isola di inquinamento urbana.

La geometria più ricorrente all'interno di una città è quella che prende il nome di "canyon urbano" caratterizzata da due file parallele di edifici di elevata altezza con interposta una strada stretta e lunga. Ad una disposizione di questo tipo corrisponde un'elevata rugosità.

I parametri geometrici necessari per caratterizzare un canyon urbano sono:

- altezza media degli edifici (H)
- dimensione trasversale ossia distanza che intercorre tra gli edifici (W)
- dimensione longitudinale ossia lunghezza degli edifici (L)

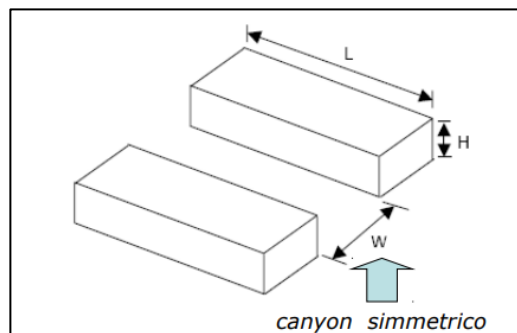


Figura 1.16 Parametri geometrici necessari a caratterizzare un canyon urbano (http://www.arpalazio.net/main/aria/didattica/corso01/Micro_meteo_08_2011.pdf)

Questi parametri permettono di definire due dei quattro fattori utilizzati per lo studio dei canyon urbani:

- fattore di forma degli edifici L/H
- fattore di forma W/H
- fattore di vista del cielo SVF
- orientamento rispetto ai punti cardinali

Il fattore di forma degli edifici L/H serve ad individuare le diverse possibili tipologie di canyon urbano:

- $L/H = 1 \rightarrow$ canyon regolare;
- $L/H \geq 2 \rightarrow$ canyon profondo;

- $L/H \cong 3 \rightarrow$ canyon corto;
- $L/H \cong 5 \rightarrow$ canyon medio;
- $L/H \cong 7 \rightarrow$ canyon lungo;

Invece il FATTORE DI FORMA o ASPECT RATIO $AR=W/H$ permette di distinguere i possibili regimi del flusso di vento che scorre perpendicolarmente all'asse del canyon urbano in:

a) ISOLATED ROUGHNESS FLOW ($W/H > 3,5$)

Gli edifici sono talmente distanti l'uno dall'altro che agiscono come elementi di rugosità senza creare interferenze nel flusso che ricorda quello che investe un edificio isolato, con formazione di due vortici non interagenti.

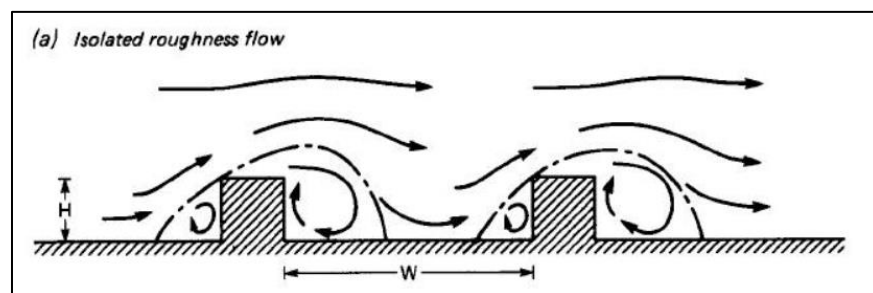


Figura 1.17 Regimi di flusso associati al flusso d'aria su matrici di edifici al variare di W/H (Oke T.R. "Street Design and Urban Canopy Layer Climate" 1988)

b) WAKE INTERFERENCE FLOW ($1,5 < W/H < 3,5$)

Gli edifici non sono troppo distanti l'uno dall'altro quindi creano una leggera interferenza con il flusso. All'interno del canyon si formano due vortici interagenti tra loro: uno più grande asimmetrico e uno più piccolo, il cui centro risulta spostato sulla parete dell'edificio di monte.

Una disposizione di questo tipo è caratterizzata da un debole scambio d'aria con il flusso esterno.

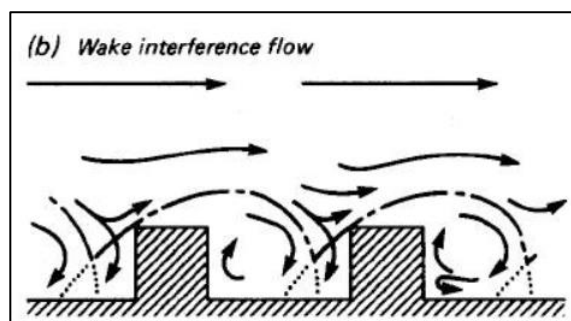


Figura 1.18 regimi di flusso associati al flusso d'aria su matrici di edifici al variare di W/H (Oke T.R. "Street Design and Urban Canopy Layer Climate" 1988)

c) SKIMMING FLOW ($W/H < 1,5$)

Gli edifici sono molto ravvicinati questo comporta la formazione all'interno del canyon di un singolo vortice stabile, caratterizzato da una velocità inferiore rispetto al flusso sovrastante e che impedisce al flusso esterno di entrare nel canyon. Quindi in questo caso il moto di aria interno al canyon è indipendente dal flusso esterno.

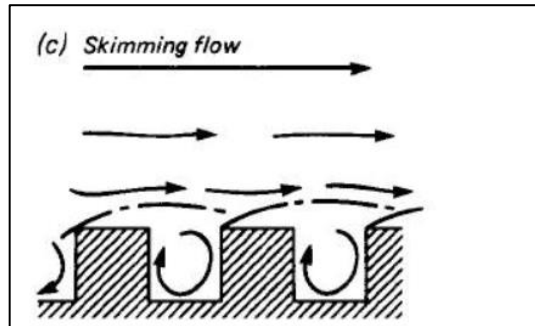


Figura 1.19 Regimi di flusso associati al flusso d'aria su matrici di edifici al variare di W/H (Oke T.R. "Street Design and Urban Canopy Layer Climate" 1988)

La figura 1.16 rappresenta un diagramma empirico nel quale viene rappresentato quanto la geometria urbana (indicata dal fattore di forma H/W) incida sull'intensità dell'isola di calore urbana ($\Delta T_{u-r}(\max)$).

Si nota come all'aumentare del fattore di forma H/W (quindi al diminuire di W/H cioè con edifici molto alti e ravvicinati) aumenta l'intensità dell'isola di calore urbana.

L'intensità dell'isola di calore urbana è definita come la differenza tra la temperatura urbana e la temperatura rurale ma esistono anche due formule con cui è possibile calcolarla: in un caso in funzione del fattore di forma H/W e in un altro in funzione del fattore di vista del cielo Ψ_{sky} :

$$\Delta T_{u-r}(\max) = 7,45 + 3,97 \ln(H/W)$$

$$\Delta T_{u-r}(\max) = 15,27 - 13,88 \Psi_{sky}$$

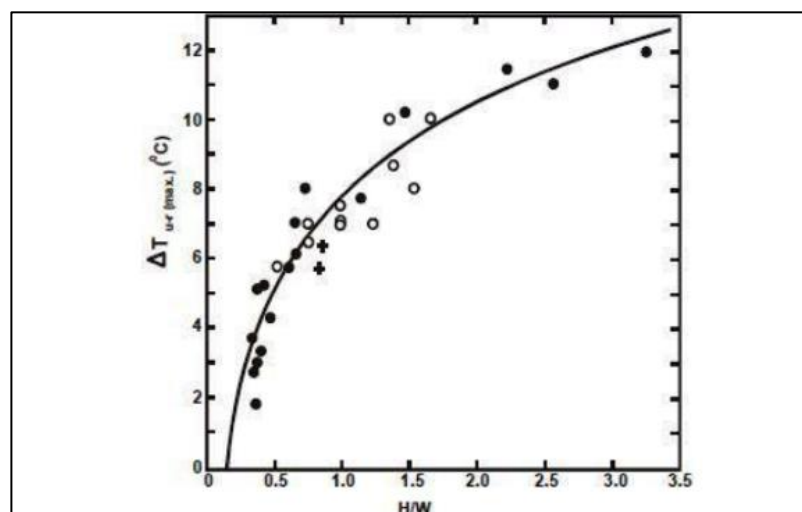


Figura 1.20 Rapporto tra UHI_{\max} ($\Delta T_{u-r}(\max)$) e il fattore di forma del canyon urbano (H/W) basato su osservazioni in 31 città americane (\bullet), europee (\circ) e australiane ($+$) (Isola calore e bilancio energetico.pdf (dicatechpoliba.it))

Le conseguenze negative che apporta il canyon urbano sono:

-il vento risulta essere meno intenso e questo comporta una limitata turbolenza quindi un limitato ricircolo di aria al suolo, il quale risulta fondamentale soprattutto di notte quando viene rilasciato il calore accumulato dalle superfici durante il giorno. L'Assenza di vento può comportare ristagno di aria calda oltre che una limitata dispersione degli inquinanti;

-le superfici hanno una limitata capacità di emettere radiazioni a onde lunghe (infrarosso) nell'atmosfera;

-le riflessioni multiple imprigionano la radiazione solare penetrata nel canyon la quale viene riflessa dalle pareti di un edificio e riassorbita dalle pareti degli edifici vicini questo comporta un intrappolamento della stessa con una conseguente difficoltà di raffreddamento dell'aria in prossimità dei canyon. Tale intrappolamento è tanto più elevato quanto minore è la larghezza della via rispetto all'altezza degli edifici (H/W elevato).

Le riflessioni multiple tipiche dei canyon urbani sono il motivo per il quale l'isola di calore si conserva anche nelle ore notturne.

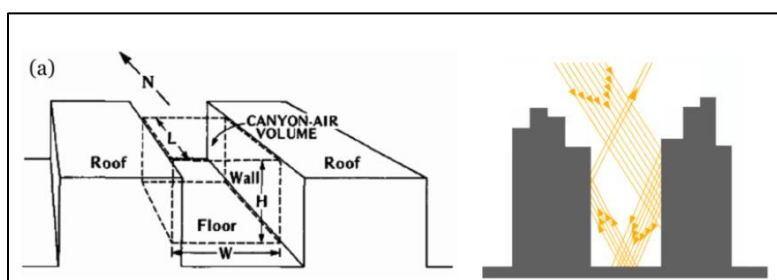


Figura 1.21 Rappresentazione schematica di un canyon urbano e dei molteplici riflessi e assorbimenti che si verificano al suo interno (Nunez and Oke, "The Energy Balance of an Urban Canyon" 1977)

- l'elevata altezza degli edifici e la loro relativa vicinanza (H/W elevato) diminuisce il fattore di vista del cielo (sky view factor SVF) limitando in tal modo il raffreddamento radiativo notturno, riducendo la velocità del vento e dunque, l'asportazione del calore.

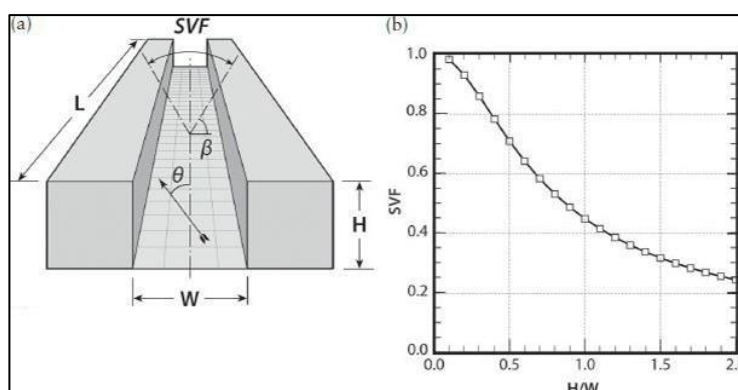


Figura 1.22 (a) Vista schematica di un canyon urbano simmetrico (b) fattore di vista del cielo (SVF) in funzione del fattore di forma (H/W) (After Erell et al, "Urban Microclimate", 2011)

Lo sky view factor è la frazione di cielo visibile ed indica la qualità di radiazione scambiata con il cielo. (Unger 2009)

Se $SVF=1$ significa che la radiazione emessa da una superficie planare è la stessa di quella ricevuta dall'intero ambiente atmosferico, viceversa se $SVF<1$ significa che un'elevata frazione della radiazione incidente rimane intrappolata.

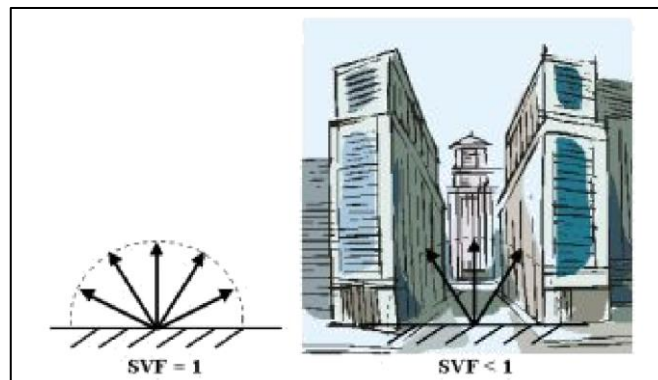


Figura 1.23 Diversi valori di SVF a seconda della pianificazione urbana (M. Rafieian; H.Rezaei Rad; A. Sharifi "The Necessity of using Sky View Factor in Urban Planning: a Case Study of Narmak Neighborhood, Tehran Mojtaba Rafieian, Hadi Rezaei Rad, Ayyoob Sharifi" 2014)

1.4.4 Scarsità di vegetazione

Come affermato da K.P. Gallo et al. in "The use of a vegetation index for assesment of the urban heat island" (2007), per analizzare il clima urbano sono stati da sempre ampiamente utilizzati i dati satellitari riguardanti la temperatura superficiale, i quali hanno permesso di ricavare la relazione, più evidente di giorno piuttosto che di notte (Roth et al. 1989), che sussiste tra la stessa e l'uso del suolo. In particolare, si è notato che le temperature superficiali più alte vengono misurate nelle aree urbane mentre quelle più basse nelle aree rurali.

Per spiegare questo risultato si è reso necessario quantificare la presenza di vegetazione in una determinata zona tramite l'indice NDVI Normalized Difference Vegetation Index, in modo tale da individuare la relazione che sussiste tra la presenza di aree verdi e la temperatura della superficie terrestre (LST).

Qihao Weng, Dengsheng Lu e Jaquelyn Schubring tramite il loro studio "Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies" hanno dimostrato che l'abbondanza di vegetazione ha una diretta influenza sulle proprietà radiative, termiche e di umidità della superficie terrestre e quindi anche sull'LST.

In particolare, Carlson et al. nel 1981 ha citato, tra le proprietà che più vengono influenzate dalla presenza della vegetazione e che possono incidere sulla riduzione dell'isola di calore urbana: la capacità termica, che nel caso di suolo inerbato risulta essere inferiore, e l'evaporazione che al contrario risulta essere maggiore per il più alto contenuto di umidità delle superfici rurali rispetto a quelle urbane. Infine, un ulteriore vantaggio dell'introduzione di vegetazione in ambiente urbano è la sua capacità, nel caso si tratti di piante ad alto fusto, di ombreggiare le superfici impedendone l'assorbimento delle radiazioni ad onda corta.

1.5 Conseguenze dell'isola di calore urbana

Il fenomeno dell'isola di calore urbana comporta una modifica del microclima urbano, uno dei fattori che maggiormente incidono sulla qualità della vita dell'uomo nelle aree cittadine.

Un peggioramento della qualità della vita comprende non solo un danneggiamento del benessere termoisometrico ma anche della salute psico-fisica dei cittadini, in particolare dei più deboli, causando malattie o addirittura la morte.

Goggins et al. nello studio intitolato "Effect Modification of the Association between Short-term Meteorological Factors and Mortality by Urban Heat Islands in Hong Kong." (2012) hanno dimostrato che la mortalità può aumentare del 4,1% nelle aree in cui un'elevata intensità della UHI comporta un aumento della temperatura di 1 °C sopra i 29 °C.

Spesso nello studiare quanto l'esposizione ad ondate di calore estreme possa incrementare la mortalità non si pone abbastanza l'attenzione sull'esposizione al calore durante la notte, i primi a dimostrare che essa incide sulla mortalità tanto quanto quella diurna e che tale impatto è più evidente quando le notti calde seguono i giorni caldi furono Murage et al. nello studio "Effect of night-time temperatures on cause and age-specific mortality in London" (2017). Il fatto che l'isola di calore si manifesta con maggiore intensità durante le notti estive è dovuto all'incapacità dei materiali urbani di rilasciare calore al contrario delle zone rurali che si raffreddano per irraggiamento.

Quindi nelle aree rurali da dopo il tramonto si inizia a sviluppare uno strato di stabilità caratterizzato da un'inversione termica mentre nelle aree urbane, a causa della temperatura che si mantiene elevata, continua a persistere una turbolenza che non permette allo strato di stabilità di svilupparsi, questo comporta la creazione di uno strato di rimescolamento notturno. Invece al mattino in città si verifica un trasporto di aria fredda dalle aree circostanti che comporta una diminuzione della differenza di temperatura tra le aree urbane e quelle rurali. Queste condizioni portano allo sviluppo dello strato di rimescolamento nelle aree rurali.

Secondo la definizione fornita dalla normativa UNI EN ISO 7730:2006 il benessere termoisometrico dell'individuo è "la condizione mentale e fisica di soddisfazione nei confronti dell'ambiente termico in cui non viene percepito né caldo né freddo". Una condizione di questo tipo è detta di neutralità termica e può essere raggiunta, tenendo sotto controllo quattro parametri fisici dell'ambiente:

- temperatura dell'aria
- contenuto di umidità dell'aria
- temperatura media radiante
- velocità dell'aria
- salubrità dell'aria (nel caso di ambiente indoor)

e due grandezze relative al soggetto:

- attività svolta, ovvero il metabolismo energetico
- resistenza termica dell'abbigliamento

La temperatura e l'umidità che devono essere garantiti in un ambiente interno dipendono dal tipo di attività che vi si svolge all'intero, solitamente i valori tipici sono: $20^{\circ}\text{C} < T < 25^{\circ}\text{C}$ e U.R.=60 %, per quanto riguarda la ventilazione il valore ottimale è di circa 2-3 m/s, infine un'ottimale salubrità dell'aria intesa come l'assenza nell'aria di sostanze inquinanti, germi, batteri, virus ecc...può essere ottenuta tramite un numero opportuno di ricambi di aria.

Sempre secondo la norma UNI EN ISO 7730:2006, gli indici utilizzati per la valutazione del confort ambientale sono il Voto Medio Previsto (Predicted Mean Value –PMV) e la Percentuale Prevedibile di Insoddisfatti (Predicted Percentage Dissatisfied – PPD).

Il valore di PMV, proposto da Fanger, si può calcolare facendo riferimento ad un ampio gruppo di persone che si trovano nello stesso ambiente in determinate condizioni di attività e vestiario oppure tramite l'equazione di Fanger:

$$\text{PMV} = \text{CT} (0,303 \cdot e^{-0,036 M + 0,028})$$

CT= carico termico ottenuto dalla differenza tra la potenza termica ceduta da un individuo all'ambiente e quella scambiata dallo stesso in condizioni omeoterme (stabilità termica del corpo)

M= dispendio metabolico dell'organismo

L'indice PMV non è altro che il giudizio medio di un gruppo di persone e da un'idea di quanto la situazione termica reale di un individuo si discosta da quella di benessere, il suo valore può variare da +3 a -3 ma ENVI-met considera come estremi per il suo calcolo -4 e +4.

Tabella n. 1	Scala di valutazione dell'ambiente termico secondo il PMV
+3	Molto caldo
+2	Caldo
+1	Leggermente caldo
0	Neutro
-1	Fresco
-2	Freddo
-3	Molto freddo

Tabella 1.7 Campo di variabilità dell'indice PMV ("Indici di valutazione per ambienti moderati" INAIL 2022)

La normativa di riferimento per tale indice è la ISO 7730, secondo la quale il PMV viene principalmente utilizzato per valutare il confort negli ambienti indoor; infatti, il modello originale di Fanger prevedeva l'utilizzo del PMV per valutare le condizioni termiche in ambienti interni. A seguito delle modifiche apportate nel 1981 a tale modello da Jendritzky e

Nubler esso divenne noto come “Klima-Michel-Model” (KMM) e cominciò ad essere utilizzato anche per delle valutazioni outdoor. Il KMM è il modello attualmente utilizzato da ENVI-met per la valutazione del PMV.

Un altro indice sempre sviluppato da Fanger è il PPD indicante la percentuale prevedibile di insoddisfatti e correlato al valore di PMV tramite l’equazione:

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{(0,03353 \cdot PMV^4 - 0,2179 \cdot PMV^2)}$$

In condizioni di $PMV = 0$ cioè in condizioni di neutralità termica il valore del PPD è pari al 5%, questo dimostra che nonostante le condizioni termiche sono ottimali c’è sempre una, seppur piccola, percentuale di soggetti insoddisfatti.

Due indici alternativi per la valutazione del comfort outdoor sono la PET (Physiological Equivalent Temperature) introdotta da P. Höppe nel 1999 - “The physiological equivalent temperature - a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment” espressa in °C quindi di più facile comprensione rispetto al PMV e l’UTCI (Universal Thermal Climate Index) basato su scambi termici del corpo umano.

In sintesi, il benessere termoigrometrico può essere garantito tramite la climatizzazione che è tanto più necessaria quanto maggiore è l’intensità dell’isola di calore.

Dal funzionamento degli impianti di climatizzazione, che per mantenere l’ambiente interno fresco prelevano calore dall’interno e lo riversano all’esterno, è possibile capire come l’isola di calore sia un fenomeno che si autoalimenta in quanto la maggiore intensità della stessa comporta un maggior consumo di energia per la climatizzazione che a sua volta incrementa la temperatura dell’aria cittadina. Tuttavia, un vantaggio individuato da M. Santamouris nello studio “On the energy impact of urban heat island and global warming on buildings” (2014) è che in inverno, grazie alle isole di calore urbane, il fabbisogno di riscaldamento può essere ridotto.

Le UHI e le UPI (urban pollution islands/isole di inquinamento urbane) si alimentano a vicenda, infatti, anche le UPI sono riconducibili alle attività antropiche svolte nei centri urbani che riversano nell’ambiente gas climalteranti (CO_2 , CH_4 , N_2O , HFC), oltre che calore. Le elevate temperature cittadine accelerano inoltre alcuni cicli chimici atmosferici generando maggiori emissioni di VOC (composti organici volatili) e favoriscono alcune reazioni fotochimiche che portano alla formazione di ozono troposferico, l’inquinante secondario responsabile dello smog fotochimico, che si forma a partire da ossidi di azoto e VOC in presenza di elevata temperatura e giornate assolate.

Una conseguenza dell’isola di calore urbana non direttamente percepibile ma altrettanto importante è il peggioramento della qualità dell’acqua superficiale a causa delle superfici urbane impermeabili che non permettono l’infiltrazione di acqua nel sottosuolo, la quale quindi scorre superficialmente (run off). Questo aumenta la quantità di acqua che confluisce direttamente all’interno dei fiumi aumentando il rischio di esondazioni e provocando l’alterazione del regime

dei corsi d'acqua. Inoltre, l'acqua di run off scorre sulle superfici che, avendo immagazzinato calore, hanno un'elevata temperatura quindi l'acqua si riscalda e finendo nei corsi d'acqua può portare al danneggiamento delle specie native che ci vivono. Il run off può portare anche ad un sovraccarico delle fognature nel caso di piogge intense e ad una ridotta alimentazione delle falde acquifere.

Infine, vi è una stretta correlazione anche tra isole di calore urbane e cambiamenti climatici in quanto non solo il Global Warming attualmente in atto comporta un'accentuazione dell'intensità dell'isola di calore urbana, ma la stessa a sua volta ha come conseguenza un aumento degli eventi climatici estremi.

Il primo a documentare un cambiamento nel regime delle precipitazioni a causa dell'urbanizzazione è stato Landsberg (1956) tramite uno studio condotto a Tulsa, in Oklahoma. Successivamente Changnon (1981) ha individuato come possibili cause dell'aumento delle precipitazioni in prossimità delle città: l'aumento dei nuclei di condensazione sulla città, l'aumento della rugosità che causa la convergenza della superficie e l'instabilità dovuta al riscaldamento urbano.

Tuttavia, studi più recenti (Reuter e Guan 1995; Reisin et al. 1996) dimostrano che i nuclei di condensazione, creati dall'inquinamento urbano, non sono effettivamente responsabili delle precipitazioni.

Tramite lo studio "Patterns and Causes of Atlanta's Urban Heat Island-Initiated Precipitation" condotto nel 2003 da P. Grady Dixon and Thomas L. Mote si è potuto dimostrare che l'umidità dell'aria ha un'influenza maggiore sulle precipitazioni rispetto all'intensità dell'UHI.

Inoltre, l'analisi del clima di Atlanta ha permesso di concludere che gli eventi di precipitazione indotti dall'UHI si verificano quando l'atmosfera è solo leggermente instabile perché è la condizione ideale per permettere ai flussi convettivi di sfruttare il calore anomalo dell'UHI e generare precipitazioni.

Nello studio condotto da Shi Zhong et al. "A case study of urbanization impact on summer precipitation in the Greater Beijing Metropolitan Area: Urban heat island versus aerosol effects" è stato dimostrato che nel GBMA l'aerosol antropogenico contribuisce in maniera più determinante alle precipitazioni rispetto a quanto faccia l'isola di calore urbana. Tuttavia, è importante sottolineare come questa influenza dipende fortemente dalle condizioni ambientali e dalla posizione geografica delle città quindi si possono ottenere risultati diversi a seconda della regione metropolitana presa in analisi. Inoltre, l'influenza dell'aerosol sull'incremento delle precipitazioni dipende anche dall'altezza e dalla fase delle nubi (Lee et al. "Examination of aerosol effects on precipitation in deep convective clouds during the 1997 ARM summer experiment" 2008; Tao et al. "Impact of aerosols on convective clouds and precipitation" 2012).

Recentemente B.M. Steensen et al. nello studio “Future urban heat island influence on precipitation” (2022) ha dimostrato, tramite l’analisi del clima di Parigi e Shanghai, che il riscaldamento globale porta ad un aumento dell’intensità e della frequenza delle precipitazioni estreme e che l’UHI porta ad una redistribuzione di tali precipitazioni: le precipitazioni si concentrano nell’area sottovento delle città.

In entrambe le megalopoli si è notata una riduzione futura dell’effetto della UHI sulle precipitazioni medie, in particolare quelle estive, e una concentrazione di queste ultime in un’area più ristretta.

Infine, l’incremento dell’isola di calore urbana ha un impatto non indifferente sui consumi energetici: per ogni aumento di temperatura di 1°C si ha un incremento della domanda di energia elettrica variabile tra 0,45% e 4,6% con conseguente aumento dei costi e danneggiamento dell’economia a livello globale. È stato dimostrato che un utilizzo dei materiali con alto albedo e una buona organizzazione degli spazi in ambito cittadino potrebbe ridurre il consumo di energia per il raffrescamento del 50/60%.

1.6 Tecniche di mitigazione dell’isola di calore urbana

Per controbilanciare le conseguenze dell’isola di calore urbana sono state da sempre condotte importanti ricerche che hanno portato nel corso degli anni allo sviluppo di tecnologie di mitigazione efficienti.

La principale tecnica di mitigazione riguarda la sostituzione dei materiali tradizionalmente usati per le superfici urbane con i COOL MATERIALS, materiali ad alto albedo con ridotto valore di assorbimento di radiazione solare ed elevato valore di emissività (cioè elevato valore di energia irraggiata) che equivale a dire materiali con elevato valore di indice di riflettanza solare (solar reflectance index SRI) parametro maggiormente rappresentativo il cui valore dipende dalla combinazione dei precedenti due.

L’indice SRI viene calcolato, secondo le indicazioni di Santamouris (2001) in questo modo:

$$SRI = 100 \cdot \frac{(T_b - T_s)}{(T_b - T_w)}$$

T_s = temperatura di equilibrio della superficie che si sta analizzando

T_b = temperatura di equilibrio di una superficie di riferimento nera in condizioni ambientali standard (albedo 0,05; emissività di 0,9)

T_w = temperatura di equilibrio di una superficie di riferimento bianca in condizioni ambientali standard (albedo 0,8; emissività 0,9)

L'indice SRI ha un valore compreso tra 0 e 100: più l'indice è alto meno la superficie esposta all'irraggiamento solare incrementerà la sua temperatura per questo si parla di pavimentazione fredda.

I cool materials hanno per lo più colorazioni chiare che permette loro di assorbire una ridotta quantità di radiazione solare ad onda corta (visibile) ma possono essere anche colorati con capacità di riflettere radiazioni solari ad onda lunga (infrarosso).

Un esempio di cool material è il calcestruzzo che, a differenza dell'asfalto $\alpha=0,05$, ha un'albedo variabile nel range: $\alpha=0,25-0,30$.

Nel caso in cui tali materiali vengono utilizzati nelle pavimentazioni esse prendono il nome di COOL PAVEMENTS cioè pavimentazioni dotate di un'elevata riflettanza solare. Per ottenere pavimentazioni riflettenti un'altra strategia è quella di utilizzare RIVESTIMENTI INTELLIGENTI con ADDITIVI COLORANTI che possono essere aggiunti anche durante interventi di manutenzione e che, secondo quanto stimato da Ferguson (2008), permettono di elevare la quantità di radiazione riflessa da un 5-40% ad un 75% oppure in alternativa con ADDITIVI NANO-TECNOLOGICI

(es. vernici termocromatiche e phase change material PCM) o ancora con i COOL COATING, materiali liquidi con elevata emittanza termica e riflettanza solare, utilizzati per il trattamento superficiale, specialmente dei tetti, come protezione dai raggi ultravioletti e dai danni chimici causati dall'acqua.

L'utilizzo di una di queste tecniche su una superficie di copertura permette di ottenere i COOL ROOF i quali sono caratterizzati da un'emissività e un potere riflettente maggiori rispetto ai tetti tradizionali e quindi consentono una minore trasmissione di calore all'interno dell'edificio a vantaggio di un maggiore confort indoor estivo riducendo in tal modo la necessità di raffrescamento; di contro in inverno i cool roof potrebbero comportare una maggiore richiesta di riscaldamento.

È necessario però specificare che le pavimentazioni altamente riflettenti presentano anche degli svantaggi tra cui l'eccessiva riflessione nei luoghi di stazionamento delle persone che potrebbero subire stress termico per l'assorbimento della radiazione solare riflessa, abbagliamento durante la guida e scarsa visibilità delle linee bianche di demarcazione delle corsie ma d'altro canto portano anche ad un miglioramento della visibilità notturna e una conseguente riduzione dell'esigenza di illuminazione stradale. (Santamouris, M. et al. "In Advances in the Development of Cool Materials for the Built Environment" 2013).

Mentre per le coperture è sufficiente intervenire sull'albedo e l'emissività, per le pavimentazioni bisogna considerare anche la permeabilità, l'inerzia termica e la convezione.

Detto ciò, una pavimentazione urbana deve essere modificata non solo dal punto di vista dell'albedo ma anche della permeabilità e porosità che sono proprietà importanti tanto quanto la riflettività nella modifica del bilancio energetico superficiale.

A causa dei risultati contrastanti ottenuti per le pavimentazioni porose esse sono ancora in fase di studio e sperimentazione.

Invece la caratteristica delle pavimentazioni su cui si può andare indiscutibilmente ad agire è la permeabilità che mitiga l'impatto delle piogge violente, consente l'infiltrazione di acqua, quindi, favorisce l'evaporazione e il conseguente raffreddamento, riduce la quantità di acqua meteorologica conferita in fognatura e il run off superficiale.

Sempre rimanendo nell'ambito delle pavimentazioni, recentemente sono state implementate, per le aree a ridotto traffico veicolare (parcheggi, piste ciclabili, aree destinate a traffico pedonale), PAVIMENTAZIONI IN MASSELLI AUTOBLOCCANTI che trattengono meno calore rispetto all'asfalto, riflettono più radiazione solare e sono permeabili. Un'altra pavimentazione che svolge lo stesso ruolo è quella realizzata in CIOTTOLI, in quanto limita fortemente il run off, favorisce l'infiltrazione e l'evaporazione.

Al contrario delle modifiche apportate alle pavimentazioni che potrebbero risultare dispendiose, le NATURE BASED SOLUTIONS (NBS) rappresentano uno dei metodi più facilmente attuabili con cui contrastare l'isola di calore urbana e consistono nella piantumazione di alberi, arbusti, corridoi verdi, superfici erbose, parchi urbani, pareti vegetali e tetti verdi oltre che nel preservare le aree verdi già presenti.

Secondo quanto stabilito da Razzaghmanesh et al. "Air temperature reduction at the base of tree canopies" (2021) gli alberi possono ridurre notevolmente la temperatura dell'aria nelle giornate calde; i vantaggi da loro offerti sono legati all'albedo più elevato, rispetto alle superfici urbane, che permette di immagazzinare solo una piccola quantità di calore, la maggior parte del quale viene usato per i processi vitali delle piante, all'evapotraspirazione e all'ombreggiamento che permettono un abbassamento della temperatura dell'aria in città: la prima sfruttando il calore latente, che viene sottratto dall'aria ambiente, per far avvenire il passaggio di stato dell'acqua da liquido a vapore, il secondo ostacolando il passaggio della radiazione solare incidente che quindi raggiunge le superfici urbane in minore quantità lasciandole più fresche.

Una soluzione ampiamente utilizzata negli ultimi anni riguarda i GREEN ROOF (tetti verdi): Razzaghmanesh et al. in "T. The role of green roofs in mitigating Urban Heat Island effects in the metropolitan area of Adelaide, South Australia. Urban For. Urban Green" (2016) hanno dimostrato che il ricoprimento del 30% della superficie totale del tetto con tetti verdi consente di ridurre la temperatura superficiale di 0,06 °C.

Dato che l'installazione di questi tetti può risultare piuttosto complessa e costosa spesso si installano al loro posto i precedentemente citati COOL ROOF: tetti ricoperti da materiali altamente riflettenti ed emissivi.

Entrambe le tipologie di tetti migliorano l'efficienza energetica degli edifici oltre che l'intero microclima urbano. Il cool roof, rispetto al green roof, può comportare anche un vantaggio strutturale se utilizzato in strutture sensibili ad escursioni termiche (es. strutture in acciaio) in quanto consente una riduzione delle variazioni di temperatura.

Invece l'aspetto competitivo dei green roof rispetto ai cool roof è il fatto che i primi combinano un minor albedo con un incremento dell'evapotraspirazione che invece non è consentita dai secondi; questo comporta una notevole differenza di temperatura superficiale tra le due tipologie di tetti: 33-48°C per i primi contro 76°C per i secondi. (Bell e Berghage 2008)

In ogni caso il vantaggio dell'utilizzo di una delle due tipologie di tetto rispetto al tradizionale black roof è evidente infatti quest'ultimo, nonostante l'emissività elevata (90%), ha un'albedo molto basso (5%) che lo portano a raggiungere temperature di circa 85°C

Sia l'utilizzo delle superfici chiare sia l'incremento della vegetazione comportano un abbassamento della temperatura delle superfici e quindi dell'aria con conseguente riduzione dello smog fotochimico del 10% circa.

Infine, si può ottenere una riduzione dell'intensità dell'isola di calore urbana andando ad INCREMENTARE LA PRESENZA DI CORPI D'ACQUA in città in quanto l'acqua ha un calore specifico quattro volte superiore a quello dei materiali solitamente usati nelle aree urbane, di conseguenza, anche l'inerzia termica è superiore e questo permette di ritardare e tamponare la temperatura massima.

L'abbassamento della temperatura cittadina dovuta alla presenza degli specchi d'acqua è inoltre favorito sia dalla loro capacità di modificare i venti locali (Akbari et al. 2008) sia dall'incremento del processo di evaporazione sia dalla bassa riflettività dell'acqua che provoca una bassa riflessione solare sulle superfici circostanti, evitando in tal modo il loro riscaldamento (Littlefair et al. "Environmental Site Layout Planning: Solar Access, Microclimate and Passive Cooling in Urban Areas" 2000).

Dato che una conseguenza importante dell'isola di calore urbana è l'incremento dei consumi energetici per il raffrescamento in estate e per il riscaldamento in inverno che a loro volta comportano un aumento dell'intensità dell'isola di calore urbana un'altra possibile tecnica di mitigazione potrebbe essere la DIFFUSIONE DI FONTI RINNOVABILI e la RIDUZIONE DEI FABBISOGNI ENERGETICI DEGLI EDIFICI tramite un opportuno isolamento, un adeguato orientamento degli edifici tale da poter sfruttare la radiazione solare per il riscaldamento, tramite un ombreggiamento offerto da vegetazione piantumata in prossimità

degli stessi o tramite un raffrescamento dovuto ad una vicinanza con degli specchi d'acqua. Questi escamotage messi in atto per la riduzione dei consumi energetici permettono di ridurre i carichi antropogenici.

In conclusione, dato che le cause principali dello sviluppo dell'isola di calore urbana sono la conformazione degli edifici unitamente alla scarsa vegetazione presente e alle proprietà termiche e radiative dei materiali utilizzati nei centri cittadini, è importante agire con UN'ATTENTA PIANIFICAZIONE URBANISTICA e un'altrettanta minuziosa progettazione degli edifici che sia volta all'attuazione delle tecniche di mitigazione precedentemente elencate allo scopo di mitigare l'isola di calore urbana sia per le aree già costruite sia per quelle in futura costruzione. A questo si deve affiancare una sempre più meticolosa politica di controllo delle condizioni ambientali e uno sviluppo di iniziative sul clima valide sia a livello internazionale sia di singola amministrazione cittadina con particolare attenzione non solo alla implementazione delle strategie di mitigazione dell'isola di calore urbana ma anche al monitoraggio delle stesse.

Capitolo 2

IL VERDE URBANO COME STRUMENTO DI MITIGAZIONE

Come detto precedentemente la pianificazione urbanistica gioca un ruolo importante nella riduzione del problema dell'isola di calore urbana.

In particolare, durante tale pianificazione bisogna porre particolare attenzione alla progettazione e ridistribuzione delle aree verdi, in quanto sono indicatrici di un'ottima qualità urbanistica oltre che di uno sviluppo urbano sostenibile che tenga conto contemporaneamente di efficienza economica, equità sociale e integrità ambientale (R. Camagni et al. "Towards sustainable city policy: an economy-environment technology nexus" 1998)

Data la facilità di attuazione e l'irrisorio dispendio economico che comporta, la piantumazione del verde urbano è considerata una delle migliori tecniche di mitigazione.

Quindi è fondamentale affiancare sempre al piano urbanistico un piano del verde urbano, il quale ricopre un'importanza ecologica, sociale ed economica nello sviluppo delle città e consiste nella: pianificazione, progettazione, gestione del verde urbano nonché formazione degli addetti, produzione del materiale vegetale e scelta del materiale inerte e di arredo da utilizzare.

I vantaggi offerti dal verde urbano sono riconducibili alla sua capacità di:

-favorire, in virtù dell'elevata concentrazione di acqua, i processi di evapotraspirazione che comportano un abbassamento della temperatura dell'aria in quanto l'acqua viene vaporizzata sfruttando il calore immagazzinato nei tessuti fogliari o nelle superficie dei terreni o quello presente in aria, successivamente il vapore trasferito in atmosfera condensa o in quota (nubi) o al suolo (nebbia, brina, rugiada) e così facendo trasforma una grande quantità di energia in calore latente che è il responsabile dell'abbassamento della temperatura dell'aria.

In assenza di evapotraspirazione tale energia (radiazione solare infrarossa incidente) verrebbe dispersa in aria, tramite i moti convettivi, sottoforma di calore sensibile che è il principale responsabile dell'incremento di temperatura cittadina.

La radiazione solare incidente sulla vegetazione viene:

- assorbita e utilizzata per permettere la vista dei colori agli insetti impollinatori e per la fotosintesi (5%). La quantità di radiazione solare assorbita è bassa in virtù dell'elevata

albedo della vegetazione; inoltre, il fatto che questa viene usata principalmente per la fotosintesi evita che venga rimessa nell'ambiente. Questa frazione di radiazione solare è quella appartenente al visibile (in particolare alle regioni rosse e blu dello spettro) e viene assorbita dalle zone periferiche della chioma in quanto più ricche di vegetazione

- riflessa (20% variabile in base alla disposizione delle aree verdi in rapporto alle aree edificate). Questa frazione di radiazione solare appartiene all'infrarosso.
- trasmessa (10% questa quantità è variabile e dipende dalla densità della chioma, dalla tipologia e disposizione spaziale delle foglie, dal periodo di foliazione, dalla struttura del tronco e dei rami e dalla velocità di accrescimento). Questa frazione di radiazione solare appartiene al visibile.
- assorbita e rimessa come calore sensibile e calore latente, quest'ultimo tramite il processo di evapotraspirazione (entrambi i calori rappresentano circa un 65% della radiazione solare incidente variabile con intensità della radiazione, umidità, quantità di acqua a disposizione delle piante e del terreno). La frazione di radiazione solare responsabile dell'evapotraspirazione appartiene all'infrarosso.

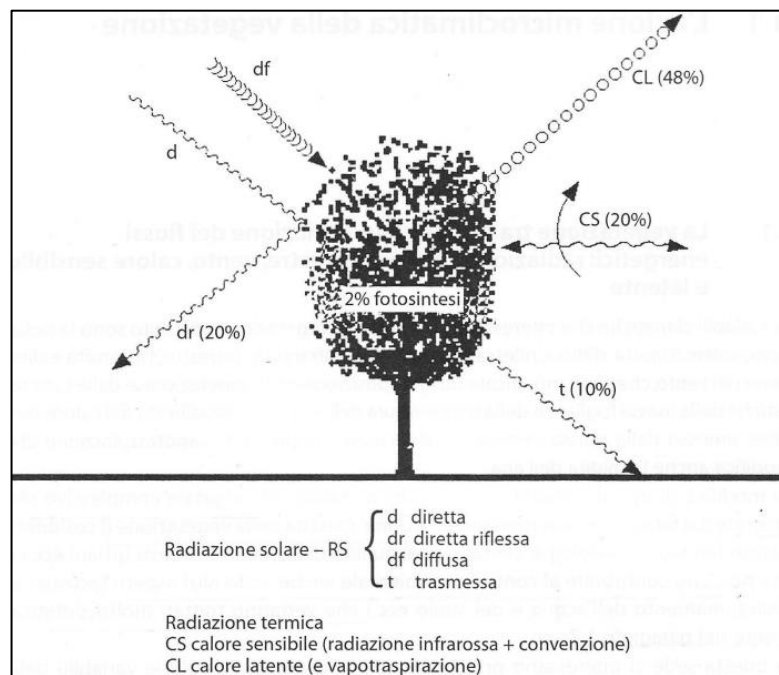


Figura 2.1 Schema degli scambi energetici tra vegetazione e ambiente circostante. ("Spazi verdi urbani" – G. Scudo, J.M.O de la Torre 2003)

-fornire ombreggiamento sia alle pavimentazioni (con conseguente diminuzione della quantità di radiazione solare incidente assorbita dalle stesse) sia agli edifici (con conseguente riduzione dei consumi energetici per il raffrescamento in estate).

La quantità di ombra prodotta è strettamente connessa alla dimensione e al portamento degli alberi ed è esprimibile tramite il coefficiente di ombreggiamento che è diverso da una

specie vegetale all'altra ed esprime la percentuale di trasmissione dei raggi solari: più è alto il coefficiente, maggiore è la radiazione trasmessa; per tale motivo sarebbe preferibile utilizzare piante con basso coefficiente di ombreggiamento estivo e alto invernale (piante caducifoglie)

Nome botanico	Coefficienti di ombreggiamento (% di trasmissione)	
	Estate	Inverno
<i>Acer platanoides</i>	0,12	0,69
<i>Acer rubrum</i>	0,24	0,74
<i>Acer saccharinum</i>	0,17	0,71
<i>Acer saccharum</i>	0,16	0,69
<i>Aesculus hippocastanum</i>	0,11	0,73
<i>Albizia julibrissin</i>	0,17	0,68
<i>Amelanchier canadensis</i>	0,23	0,57
<i>Betula alba</i>	0,18	0,62
<i>Carya ovata</i>	0,23	0,66
<i>Catalpa speciosa</i>	0,24	0,68
<i>Celtis australis</i>	0,08	0,53
<i>Celtis occidentalis</i>	0,12	
<i>Crataegus laevigata</i>	0,14	
<i>Crataegus lavalleyi</i>	0,11	
<i>Eleagnus angustifoli</i>	0,13	
<i>Fagus sylvatica</i>	0,12	0,83
<i>Fraxinus excelsior</i>	0,15	0,59
<i>Ginkgo biloba</i>	0,19	0,63
<i>Gleditsia triacanthos</i>	0,36	0,70
<i>Juglans nigra</i>	0,09	0,63
<i>Koelreuteria paniculata</i>	0,19	0,65
<i>Liquidambar styracifula</i>	0,18	0,65
<i>Liriodendron tulipifera</i>	0,10	0,73
<i>Malus s.p.</i>	0,15	0,85
<i>Platanus acerifolia</i>	0,14	0,55
<i>Populus tremuloides</i>	0,25	
<i>Pyrus communis</i>	0,20	0,60
<i>Quercus palustris</i>	0,22	0,75
<i>Quercus robur</i>	0,19	0,77
<i>Quercus rubra</i>	0,19	
<i>Sophora japonica</i>	0,22	
<i>Tilia cordata</i>	0,12	0,59
<i>Ulmus americana</i>	0,13	0,76
<i>Ulmus pumila</i>	0,15	0,50
<i>Zelkova serrata</i>	0,20	0,74

Tabella 2.1 Coefficienti di ombreggiamento per diverse specie nella stagione invernale ed estiva. (“Spazi verdi urbani” - G. Scudo, J.M.O de la Torre 2003)

L'ombreggiamento inteso come la quantità di radiazione solare che riesce ad essere intercettata rispetto a quella che viene trasmessa dipende dalla forma e dimensione della chioma, dalla dimensione e dal tipo di foglia (identificato dall'indice di area fogliare - Leaf Area Index-LAI che misura la superficie fogliare per unità di superficie del suolo) dalla densità e forma

della chioma, dal periodo di fogliazione e velocità di accrescimento.

-diminuire l'inquinamento atmosferico grazie a processi di metabolismo vegetale che comportano una riduzione di particolato atmosferico e di sostanze nocive presenti in aria. Tale capacità filtrante è maggiore nelle conifere in virtù della loro area fogliare maggiore e

per il fatto che non perdono le foglie in inverno mentre è inferiore nelle piante a fiore che però sono meno sensibili all'inquinamento quindi tendono a sopravvivere di più.

-filtrare il rumore (questo effetto è direttamente proporzionale all'espansione in larghezza della superficie alberata o della siepe)

-diminuire la concentrazione di CO₂ che viene assorbita dalle piante e utilizzata nel processo di fotosintesi clorofilliana. Essendo la CO₂ uno dei principali gas serra il suo assorbimento da parte delle piante consente una diminuzione dell'effetto serra e quindi una mitigazione dei cambiamenti climatici

-creare delle brezze termiche in virtù del salto termico che si genera tra zone più fresche per la presenza di vegetazione e zone calde. Tali brezze fresche giocano un ruolo importante soprattutto d'estate in quanto riesce a diminuire la differenza di temperatura e a dissipare calore

-diminuire di circa il 30% l'utilizzo del condizionamento estivo grazie alla capacità degli alberi di produrre ombreggiamento agli edifici e diminuire del 20-50% il riscaldamento invernale grazie alla capacità degli alberi di proteggere gli edifici dal vento (dati forniti dalla Fao).

In realtà, secondo quanto stabilito dalla Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile (Enea), anche tetti e pareti verdi utilizzate negli edifici contribuiscono ad un abbassamento della necessità di raffreddamento del 15% grazie alla loro capacità di ridurre il flusso termico e ad una riduzione della necessità di riscaldamento del 10% in virtù dell'effetto "camino" che si crea tra parete e coltre vegetale ossia una ventilazione naturale che elimina l'umidità presente nelle pareti esterne riducendo in tal modo la dispersione termica dell'edificio (Dott. Carlo Alberto Campiotti del Dipartimento Unità Efficienza Energetica di ENEA)

-prevenire l'erosione al suolo

-svolgere una funzione protettiva alle scarpate e a zone esposte a periodiche frane

-garantire infiltrazioni di acqua nel sottosuolo e quindi un più adeguato drenaggio di acqua piovana. In tal modo si limita la quantità di acqua in arrivo ai corsi d'acqua, la possibilità di allagamento degli stessi e il quantitativo di acqua in arrivo alla fognatura

-migliorare la qualità della vita non solo per questioni correlate al miglioramento del clima ma anche per le possibilità di svago e attività fisiche ad esso correlate nonché l'agevolazione alle relazioni sociali come affermato da Francesco Dal Co, storico dell'architettura italiana, secondo il quale "la creazione di spazi attrezzati all'interno dei nuclei residenziali, permette di ritagliare dalla vita urbana uno spazio comunitario che ha la funzione di incentivare al massimo la vita di relazione degli abitanti"

-conservare e favorire l'aumento della biodiversità sia animale che vegetale

Il concetto di verde urbano ha subito continue modifiche nel corso dei secoli. Oggi, secondo la definizione fornita dall'Istat, con il termine "verde urbano" si intende "il patrimonio di aree

verdi che insiste sul territorio dei comuni gestito, direttamente o indirettamente, da enti pubblici quali i comuni, le province, le regioni, lo Stato.”

Secondo la classificazione redatta dall’istituto nazionale di statistica ISTAT nel 2016 il verde urbano comprende:

- verde attrezzato ossia piccoli parchi e giardini di quartiere con giochi per bambini, panchine, piste ciclabili, campi sportivi etc. (estensione <5000 m²);

- parchi urbani ossia aree con funzione ricreativa, culturale e ambientale (con estensione >5000 m²);

- verde storico ossia ville, parchi, giardini che hanno un interesse artistico o storico compresi gli alberi monumentali (sono aree tutelate secondo quanto stabilito dal D.Lgs 42/2004);

- aree di arredo urbano ossia aree con fini estetici e/o funzionale come viali alberati, verde stradale, rotonde e aiuole spartitraffico, aree di sosta;

- aree speciali ossia aree verdi con finalità particolari (giardini scolastici, giardini zoologici, orti botanici, vivai, aree sportive pubbliche all’aperto, cimiteri etc.);

- aree boschive non ricadenti in aree naturali protette.

Il verde attrezzato, i parchi urbani, il verde storico e le aree di arredo urbano fanno parte del verde urbano cioè quel verde presente all’interno delle città totalmente fruibile dai cittadini eccetto per i giardini storici e alcuni parchi urbani protetti.

Invece il verde sportivo, scolastico, gli orti e i cimiteri fanno parte del verde funzionale cioè quel verde realizzato, a servizio dei cittadini, per assolvere ad un determinato scopo.

Ogni amministrazione comunale segue diversi criteri per la progettazione di nuovi giardini, parchi e aree verdi ma senza dubbio alcune linee guida comuni sono:

- privilegiare specie arboree autoctone, come stabilito dal Regolamento UE 1143/2014, piuttosto che alloctone ossia non native del territorio in esame in quanto queste presentano dei tassi di riproduzione molto elevati con possibile rischio di diminuire o addirittura estinguere le specie native a fronte di una maggiore diffusione di specie esotiche invasive. Tutto ciò può avere come conseguenza una drastica riduzione della biodiversità sia vegetale che animale che al contrario deve essere rispettata e tenuta in considerazione nella progettazione delle aree verdi. Un altro vantaggio dell’utilizzo delle piante autoctone è il fatto che il loro ciclo di fogliazione-defogliazione è in fase con la domanda di raffrescamento-riscaldamento. Nel caso in cui le piante utilizzate non siano autoctone è preferibile, per ovviare alla caduta delle foglie, utilizzare specie a stagione vegetativa breve nei climi freddi e specie a stagione vegetativa lunga nei climi caldi

- rispettare le distanze ottimali tra alberi, costruzioni limitrofe e sedi stradali privilegiando verde urbano che sia il più possibile compatto e non frammentato in quanto l’efficacia di mitigazione dell’isola di calore urbana è direttamente proporzionale alla sua ampiezza come è stato dimostrato da uno studio di R.A. Spronken-Smith e T.R. Oke “The

thermal regime of urban parks in two cities with different summer climates” (1994) secondo il quale l'influenza dei parchi sulla temperatura dell'aria sembra essere limitata a una distanza circa pari alla larghezza del parco stesso.

-porre attenzione al tipo di piante da utilizzare sapendo che le specie vegetate introdotte devono essere adatte al clima locale e resistenti all'ambiente urbano per questo motivo si tende a preferire specie a crescita veloce, resistenti alla siccità e che richiedono poca potatura mentre si preferisce evitare gli alberi ad alto fusto (es. pini marittimi) in quanto possono provocare intralcio alla circolazione: le radici tendono a sollevare i marciapiedi e la loro stabilità precaria può essere messa a dura prova da eventi metereologici estremi.

Nelle zone a clima temperato le piante più adatte sono quelle decidue che in inverno lasciano passare gran parte della radiazione solare invece d'estate la schermano.

Inoltre, è importante variare il più possibile le specie di piante introdotte in modo da scongiurare malattie e parassiti.

Altre due caratteristiche da tenere in considerazione nella scelta della specie di albero sono il portamento e la dimensione entrambi fondamentali nella definizione della forma e dimensione dell'ombra che riescono a generare.

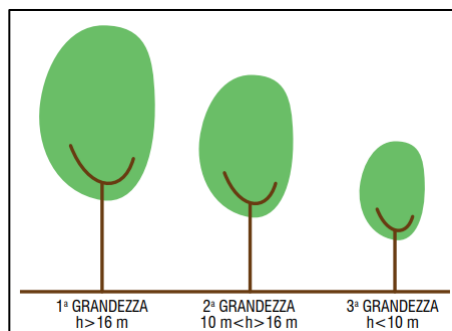


Figura 2.2 Le tre classi di dimensione degli alberi a completa maturità (Piano del Verde del Comune di Padova)

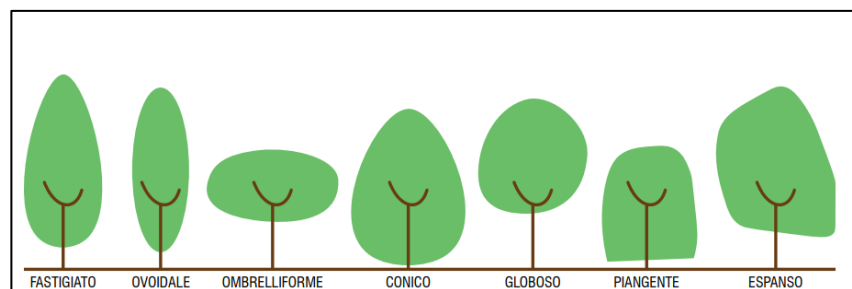


Figura 2.3 Il portamento degli alberi (Piano del Verde del Comune di Padova)

Portamento	Piante	Caratteristiche
1 Fastigiato (slanciato, colonnare)	<i>Cupressus sempervirens</i> , <i>Cupressus arizonica</i> , <i>Populus nigra</i> , <i>Quercus</i> , <i>Taxus baccata fastigiata</i> , <i>Thuja</i> , <i>Carpinus</i>	La chioma e i rami che la determinano aderiscono al tronco formando angoli molto stretti di circa 30°
2 Espanso	<i>Catalpa</i> , <i>Cedrus Libani</i> , <i>Pinus pinea</i> , <i>Paulownia</i>	È dato dalla divaricazione dei rami rispetto al tronco con il quale formano angoli di circa 90° con andamento orizzontale
3 Ovoidale	<i>Betula alba</i> , <i>Quercus</i> , <i>Tilia</i> , <i>Prunus</i> , <i>Acer</i> , <i>Juglans</i> , <i>Platanus</i> , <i>Ulmus</i> , <i>Robinia</i> , <i>Sorbus</i> , <i>Cupressus</i> , <i>Pinus Sylvestris</i> , <i>Pinus nigra</i> , <i>Fraxinus</i> , <i>Juniperus communis</i>	Predominanza dei rami centrali sui laterali che formano con il tronco angoli da 40° a 70° con andamento verso l'alto
4 Arrotondato	<i>Aesculus</i> , <i>Citrus</i> , <i>Olea</i> , <i>Sophora</i> , <i>Prunus pissardi</i>	I rami sono inseriti al fusto con il quale formano angoli da 40° a 70°
5 Conica	<i>Carpinus</i> , tutte le conifere, <i>Magnolia grandiflora</i> , <i>Sequoia</i> , <i>Cedrus atlantica</i> , <i>Taxodium distichum</i>	I rami si allontano simmetricamente dall'asse principale formando angoli di 90°
6 Piangente	<i>Salix babilonica</i> , <i>Betula pendula</i> , <i>Fraxinus pendula</i> , <i>Sophora pendula</i>	I rami sono rivolti verso il suolo
7 Strisciante e tappezzante	<i>Cotoneaster</i> , <i>Vinca minor</i> , <i>Hedera</i> , <i>Sagina subulata</i>	Piante che si sviluppano al suolo
8 Cespuglioso	<i>Berberis</i> , <i>Buxus</i> , <i>Viburnum tinus</i> , <i>Laurus nobilis</i> , <i>Mahonia</i> ,	Si tratta di un portamento più o meno compatto tipico di molti arbusti
7 Rampicante	<i>Ampelopsis</i> , <i>Clematis</i> , <i>Hedera</i> , <i>Jasminum</i> , <i>Wistaria</i> , <i>Polygonum</i>	Si differenziano a seconda del sistema di ancoraggio

Tabella 2.2 Classificazione di alcune specie comunemente utilizzate per tipo di portamento.

(“Spazi verdi urbani” - G. Scudo, J.M.O de la Torre 2003)

Inoltre, la scelta delle specie è in funzione anche delle loro esigenze ambientali ed agronomiche nonché del contesto urbano.

Non da ultimo è da considerare il fattore di accrescimento. Dato che solitamente gli alberi raggiungono il massimo accrescimento dopo diversi anni dalla piantumazione, possono essere utilizzate piante a rapida crescita o già cresciute ma essendo queste ultime piuttosto costose spesso si preferisce ricorrere a impianti misti con specie definitive a crescita lenta e specie provvisorie a crescita rapida da trapiantare in un secondo momento oppure abbinare impianti a crescita lenta con protezioni tecnologiche leggere (tende, cannicci, ecc.) da eliminare successivamente

-porre attenzione al posizionamento delle piante: in particolare gli alberi di maggiori dimensioni vanno preferibilmente posti sul lato occidentale e orientale dell'abitazione per schermare i muri dai raggi obliqui del sole invece le piante sempreverdi vanno preferibilmente poste nel lato settentrionale per attenuare i venti freddi

Infine, alcune tipologie di piante (es. querce) sarebbero da evitare in quanto emettono un grande quantitativo di composti organici volatili (BCOVs) che reagendo con gli ossidi di origine antropica presenti in atmosfera possono portare alla formazione dell'ozono.

-porre attenzione all'ottimizzazione dei costi di cura e manutenzione in fase di progettazione.

Uno studio condotto dall'Istat nel 2016 ha permesso di individuare, per diversi comuni del territorio italiano, la disponibilità di verde pubblico pro-capite espressa in m²/ab.

Da tale analisi è emerso un divario evidente tra la quantità di aree verdi a disposizione dei cittadini nelle regioni del Nord e in quelle del Sud nelle quali i valori sono decisamente inferiori. Nonostante in alcune città il verde urbano a disposizione dei cittadini non raggiunga il limite minimo di 9 m²/ab stabilito dal decreto ministeriale D.M. 1444/68, la disponibilità media in Italia si aggira intorno ai 31 m²/ab.

Bisogna specificare che tale indicatore tiene conto solo delle aree verdi che possono essere effettivamente sfruttate dai cittadini non considerando le aree naturali protette che però apportano al territorio gli stessi vantaggi del verde urbano.

Secondo quanto stabilito dall'indicatore appena introdotto la quantità di verde urbano non è irrisoria ma, nonostante ciò, gli effetti mitigativi sono ancora scarsamente percepibili questo è dovuto al fatto che l'evoluzione che si è avuto nel corso degli anni del concetto di verde urbano da semplice elemento di arredo a strumento di regolazione del microclima non è stata accompagnata da un adeguato sviluppo delle metodologie di pianificazione urbanistica.

Ad oggi la normativa a cui si fa riferimento per la progettazione del verde urbano è la legge 10/2013 "Norme per lo sviluppo degli spazi verdi urbani" all'interno della quale sono contenute indicazioni utili ad incrementare gli spazi verdi in accordo con quanto stabilito dal protocollo di Kyoto:

- tutti i comuni con più di 15000 abitanti devono dotarsi di un catasto degli alberi;
- le amministrazioni comunali devono produrre a fine mandato un bilancio del verde;
- per ogni bambino nato o adottato deve essere piantato un nuovo albero;

Come precedentemente accennato gli effetti della vegetazione sull'ambiente circostante si suddividono in:

-effetti climatici (modifica della radiazione solare e variazione della temperatura dell'aria, variazione della velocità e direzione del vento, variazione dell'umidità relativa);

-effetti non climatici (controllo della luminosità e dei fenomeni di abbagliamento, controllo del rumore, abbattimento delle sostanze inquinanti, qualità dell'acqua, protezione del suolo come ad esempio controllo della stabilità dei versanti ed erosione, conservazione della vita animale, produzione della biomassa, funzione socioeconomica).

2.1 Effetti climatici della vegetazione

Modifica della radiazione solare e variazione della temperatura dell'aria:

Dato che, secondo la legge di Planck, alla radiazione solare è associata una certa quantità di energia inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda λ ($E=h \cdot \nu = h \cdot c / \lambda$) è importante analizzare l'interferenza della vegetazione sulla radiazione solare incidente perché la presenza del verde urbano potrebbe modificare il bilancio energetico superficiale.

Il vantaggio che apporta la vegetazione è duplice: da un lato le piante, con le loro chiome, intercettano la radiazione solare provocando una sensibile riduzione della frazione trasmessa e conseguentemente della temperatura delle superfici ombreggiate, dall'altro le piante e i terreni ricoperti di vegetazione sono più ricchi di acqua rispetto ai terreni cementati impermeabili di conseguenza il loro riscaldamento è più lento poiché gran parte della radiazione solare infrarossa viene impiegata per vaporizzare l'acqua. Quindi avendo questi terreni meno calore a disposizione cedono meno calore sensibile (calore rilasciato all'aria sovrastante per irraggiamento e conduzione) a favore di un maggior flusso di calore latente.

Non solo la radiazione solare ma anche quella terrestre può incidere sul microclima. Per radiazione terrestre si intende la radiazione infrarossa, appartenente ad una lunghezza d'onda differente rispetto a quella solare, emessa dalla superficie di un qualsiasi corpo in base alla sua emissività e temperatura e che prende il nome di calore sensibile. Il vantaggio di una superficie vegetata è che riesce a bilanciare il calore sensibile che rilascia in aria con il calore latente sottratto all'aria tramite evaporazione.

Quindi l'effetto di riduzione della temperatura delle superfici il quale comporta anche una riduzione della temperatura dell'aria soprastante è imputabile alla vegetazione per i processi di riflessione/assorbimento/trasmissione della radiazione solare incidente e per l'evapotraspirazione che produce un effetto maggiore quanto maggiore è l'estensione della zona verde.

Oltre all'estensione anche la densità risulta essere decisiva nella diminuzione della temperatura in quanto più la vegetazione è densa più energia viene assorbita. Un altro parametro da tenere in considerazione è l'altezza delle piante perché è inversamente proporzionale alla quantità di energia che riescono a riflettere.

Bisogna però sottolineare che si risente dell'effetto di riduzione della temperatura dovuto alla presenza della vegetazione solo su scala locale e fino ad una distanza verticale irrisoria perché gli scambi convettivi dell'aria che dissipano l'effetto a grandi distanze.

Variazione della velocità e direzione del vento

Il vento è caratterizzato dal movimento di molecole di aria da un'area con alta pressione ad un'area con bassa pressione, è quindi causato da una differenza di pressione a sua volta causata da una differenza di temperatura. Il vento contribuisce a dissipare il calore dalle persone in modo da migliorare il loro confort ambientale esterno e la modifica dei suoi flussi attorno agli edifici favorisce una riduzione dei consumi energetici per il raffrescamento in estate e per il riscaldamento in inverno perché consente di minimizzare le infiltrazioni di aria o di massimizzare i flussi refrigeranti a seconda di come viene disposta la vegetazione in prossimità degli edifici (Grosso M., Alessandro S. et al.)

In tal senso la vegetazione può essere utilizzata come dispositivo per l'incanalamento (foto (a)) o la deviazione (foto (b)) del vento intorno agli edifici o per aumentare la velocità del flusso generando il cosiddetto "Effetto Venturi" (foto (c))

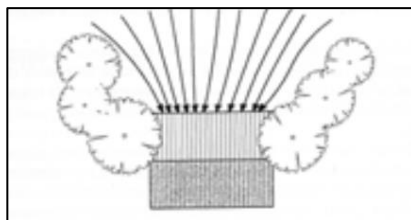


foto (a)

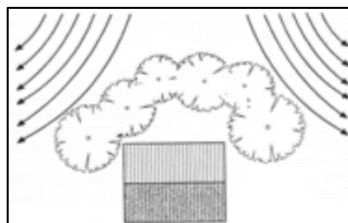


foto (b)

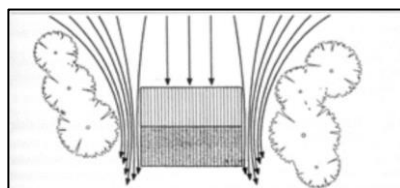


foto (c)

Figura 2.4 Effetti della vegetazione sul flusso di vento (Andrea Giacchetta docente di progettazione bioclimatica facoltà di architettura di Genova)

La diminuzione della velocità del vento e la deviazione del suo percorso è ad opera non solo della morfologia urbana, ma anche della vegetazione la quale contribuisce ad aumentare la rugosità aerodinamica. L'incidenza del verde nei confronti del vento è direttamente proporzionale alla dimensione e densità della chioma.

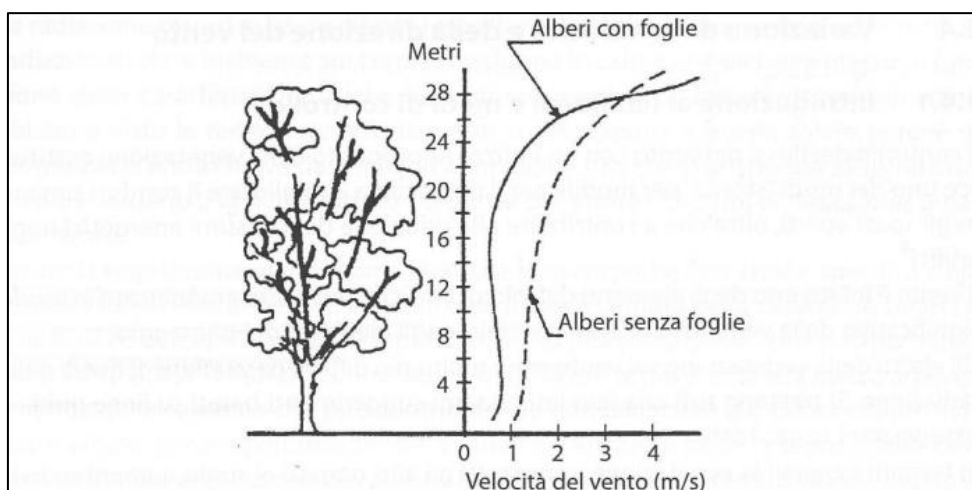


Figura 2.5 Figura 1.28 Influenza del manto fogliare nei profili di velocità del vento in un bosco di querce con e senza foglie. ("Spazi verdi urbani" - G. Scudo, J.M.O de la Torre 2003)

In questo senso la vegetazione svolge una funzione di barriera e prende il nome di barriera frangivento costituita da file di alberi ed arbusti interposti. Essa può essere classificata in funzione delle forme e dimensioni delle piante costituenti oltre che della permeabilità all'aria e della dimensione trasversale, caratteristiche dalle quali dipende la profondità della zona d'ombra.

In particolare, tanto più è elevata la dimensione trasversale tanto maggiore è la zona d'ombra cioè la zona dove la velocità del vento è ridotta perché l'energia cinetica del vento viene assorbita dagli alberi costituenti il filare.

Anche la densità della barriera frangivento gioca un ruolo importante:

-filare denso: la velocità del vento è notevolmente ridotta nella zona sottovento dove si crea una zona di calma e nelle zone di estremità del filare il flusso di vento viene deviato

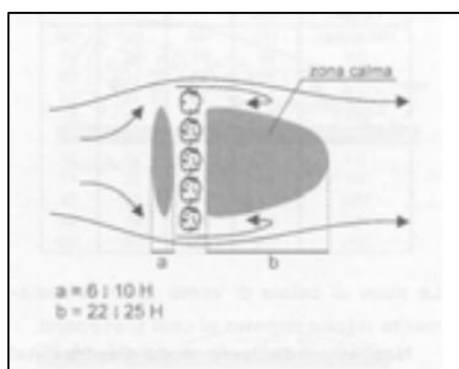


Figura 2.6 Schema del flusso di vento nel caso di filare denso (Andrea Giacchetta docente di progettazione bioclimatica facoltà di architettura di Genova)

-filare mediamente denso: nella zona sottovento si crea una differenza tra la zona vicino al filare in cui la velocità del vento risulta ridotta di meno e la zona a media e grande distanza in cui si forma una zona di calma analoga a quella del caso precedente con velocità del vento notevolmente ridotta. Come prima il fulsso del vento viene deviato nelle zone di estremità

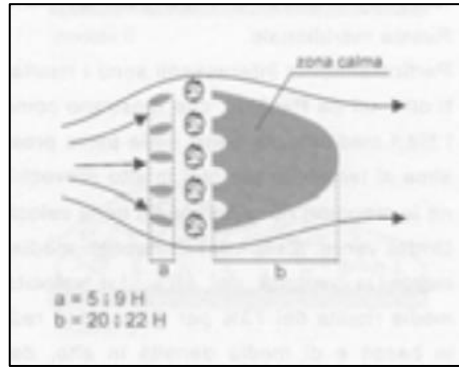


Figura 2.7 Schema del flusso di vento nel caso di filare denso (Andrea Giacchetta docente di progettazione bioclimatica facoltà di architettura di Genova)

-filare rado: la distanza tra un albero e l'altro è superiore rispetto ai casi precedenti e questo riduce l'effetto protettivo del filare e di conseguenza la velocità del vento subisce una riduzione meno intensa sia a breve sia a grande distanza. Il flusso del vento viene deviato nelle zone di estremità mentre le deviazioni sono limitate tra un elemento e l'altro del filare.

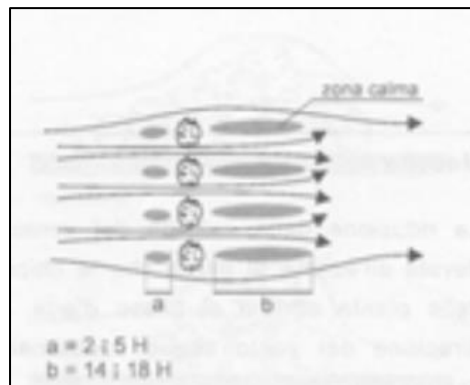


Figura 2.8 Schema del flusso di vento nel caso di filare denso (Andrea Giacchetta docente di progettazione bioclimatica facoltà di architettura di Genova)

In ogni caso la protezione dal vento che offre una barriera frangivento realizzata tramite l'uso di vegetazione è maggiore quando esso è perpendicolare alla barriera.

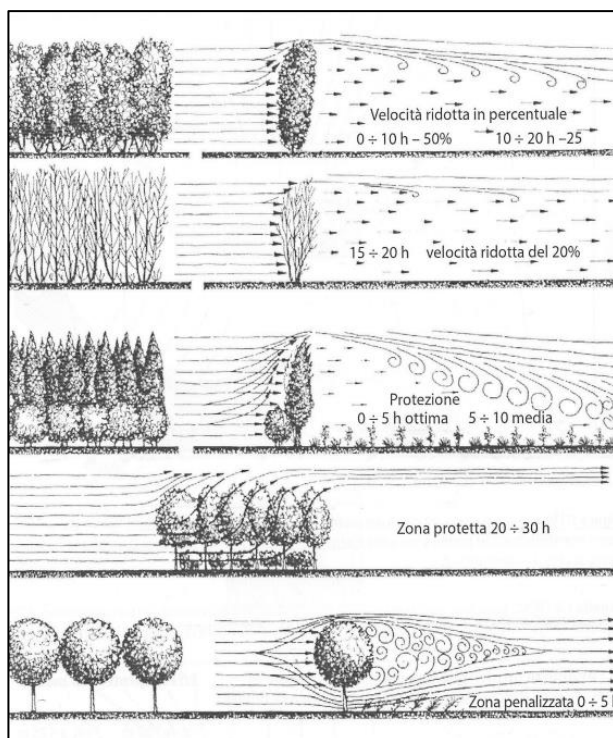


Figura 2.9 Diversi tipi di barriere frangivento con indicazioni qualitative sulla modifica dei flussi di vento. ("Spazi verdi urbani" - G. Scudo, J.M.O de la Torre 2003)

Il ruolo che svolge la vegetazione nei confronti del vento è variabile a seconda del tipo di vegetazione, della sua densità e della sua disposizione. Per questo la vegetazione viene utilizzata in maniera differente a seconda della stagione:

- in inverno si preferisce utilizzare piante sempreverdi, che non contrastano il soleggiamento, disposte in modo da creare una protezione da NE/NO;

- in estate si utilizzano piante ad elevata evapotraspirazione in modo da abbassare la temperatura dell'aria posizionate a SE/SO oppure disposte in modo da incanalare i venti e ottenere un effetto refrigerante.

Variazione dell'umidità relativa:

La vegetazione non solo modifica il vento, la radiazione solare e la temperatura dell'aria ma provoca anche un incremento dell'umidità relativa a causa del vapor acqueo rilasciato tramite l'evapotraspirazione e dell'abbassamento della temperatura dell'aria che si sa essere inversamente proporzionale all'umidità relativa.

L'umidità relativa, misurata tramite un igrometro, è definita come il rapporto tra la massa di vapore contenuta in una certa massa di aria secca e la massa di vapore alla saturazione intesa come la massima quantità di vapore che l'aria secca, a quella temperatura, può contenere:

$$U.R. = \eta = \frac{mv}{mvs}$$

Il valore di umidità relativa permette di capire quanto l'ambiente è umido (U.R.>65%) o secco (<45%). Quando $m_v=m_{vs}$ (U.R.=100%) l'aria secca è in condizioni di saturazione e si ha la condensazione del vapore.

Il valore consigliato di umidità relativa è diverso a seconda che l'ambiente sia interno o esterno: nel primo caso U.R.=60% nel secondo $20\% < U.R. < 100\%$

Il valore dell'umidità relativa è fortemente influenzato dalla presenza della vegetazione e può incidere fortemente sulla percezione della temperatura: un valore alto di U.R. porta a percepire più caldo in quanto il corpo umano non riesce ad espellere energia attraverso il sudore. Ma anche un valore troppo basso di U.R. può portare ad altrettanti problemi (es. problemi respiratori, secchezza delle mucose).

La quantità di acqua liberata da una pianta generica produce un aumento dell'umidità dell'aria, più evidente alla sera rispetto al giorno, variabile tra il 40 % e il 70 %, questo unito alla capacità dei suoli vegetati porosi di intercettare e trattenere le precipitazioni diminuendo in tal modo l'erosione, permette di aumentare e protrarre nel tempo i processi evaporativi che insieme all'ombreggiamento contribuiscono a ridurre la temperatura ambiente. Quindi è possibile affermare che una pianta, in una calda giornata estiva, svolge un'azione paragonabile a quella di 5 condizionatori in uso per 20 ore.

2.2 Effetti non climatici della vegetazione

Controllo del rumore

La vegetazione se disposta in modo da formare delle barriere di piante, cespugli o erba alta permette di abbattere il suono che l'attraversa grazie alle operazioni di riflessione, rifrazione e assorbimento: le foglie assorbono e trasformano l'energia sonora in calore o la deviano mentre il terreno assorbe o riflette le onde sonore.

Questa soluzione prende il nome di "barriera verde" che secondo la norma UNI 11160:2005 è un sistema antirumore artificiale costituito da terreno eventualmente abbinato a strutture di rinforzo, o combinato a strutture di contenimento o portanti.

Le operazioni svolte da tale barriera modificano la propagazione delle onde sonore, nello specifico allungandone il percorso dal punto di emissione a quello di ricezione, così che il rumore possa arrivare attenuato al ricevente, di una quantità pari a circa 0,1 dB – 0,2 dB per metro di spessore della barriera. Ciò significa che per avere riduzioni apprezzabili (da 5 a 10 dB) occorrono barriere vegetali piuttosto spesse (40-100 metri) che però a causa delle loro dimensioni non trovano largo impiego nei contesti urbani dove al contrario vengono

utilizzate maggiormente le barriere composite caratterizzate da un'alternanza di specie vegetali e materiale inerte (legno, cemento, elementi componibili a incastro come fioriere sovrapponibili etc.)

Paragonando le barriere naturali a quelle artificiali è facile notare queste ultime sono più efficaci (abbattimento di 10-15 dB) rispetto a quelle naturali (abbattimento di 5-6 dB) ma il vantaggio delle prime è un notevole miglioramento dell'impatto visivo della struttura. Per questo motivo le barriere verdi naturali si possono considerare una soluzione ecologica al problema dell'inquinamento acustico.

Di norma è preferibile che la barriera sia a ridosso della fonte di produzione del rumore in modo da aumentarne la sua efficienza, la quale dipende anche dalle caratteristiche del rumore oltre che dal tipo di specie utilizzate, dalla densità della chioma, dalla durata della fogliazione e dall'altezza-larghezza della fascia vegetale protettiva.

Le specie vegetali che si tende a privilegiare sono quelle con foglie anche nella parte bassa del tronco, per aumentare l'effetto barriera; sempreverdi, in modo che siano efficienti anche nei periodi invernali; specie che necessitino di una scarsa manutenzione e che siano resistenti agli agenti inquinanti.

Abbattimento delle sostanze inquinanti

Per la rimozione delle sostanze inquinanti dall'atmosfera esistono 4 metodi organizzati in due macrogruppi:

-DEPOSIZIONE A SECCO= rimozione delle sostanze inquinanti tramite una serie di processi di varia natura (chimica, biochimica, micrometeorologica, biologica, fisica etc.) che non coinvolgono l'acqua presente in atmosfera. È un processo di autodepurazione dell'atmosfera che coinvolge sia molti inquinanti gassosi sia il particolato di varia granulometria e densità. Al suo interno è possibile distinguere due metodi, entrambi fortemente dipendenti dalla orografia e vegetazione superficiale:

- decantazione gravitazionale: meccanismo di rimozione delle sostanze inquinanti che si basa sul loro peso, quindi, è significativo solo per il particolato non sottile (superiore al PM10). La formula alla base di questo meccanismo è quella derivante dalla Legge di Stokes che permette di calcolare la velocità di sedimentazione gravitazionale:

$$w = \frac{2r^2g\rho}{9\mu}$$

w=velocità di decantazione (m/s)

g=accelerazione gravitazionale (m/s)

ρ=densità della particella (Kg/m³)

r= raggio della particella (m)

μ = viscosità dinamica del fluido (Kg/m · s)

- deposizione per impatto: meccanismo di rimozione delle sostanze inquinanti che si verifica quando ci sono delle piante che agiscono da filtri. Un esempio di vegetazione che agisce secondo questa modalità sono le “green belts” ossia zone arboree (soprattutto siepi di cipresso) che permettono di filtrare il particolato grossolano e che vengono spesso utilizzate come strumento di delimitazione di zone inquinate da zone residenziali.

In questo caso la velocità di deposizione viene calcolata utilizzando formule semi-empiriche:

$$J=Vd \cdot C$$

J=flusso massivo depositato sulla superficie (Kg/m²s)

Vd=velocità di deposizione (m/s)

C=concentrazione di particolato in aria (Kg/m³)

-DEPOSIZIONE UMIDA= rimozione delle sostanze inquinanti dall'atmosfera tramite le precipitazioni. La legge che guida questo meccanismo è la Legge di Henry:

$$CL = \frac{CA}{H}$$

CL=concentrazione dell'inquinante nella pioggia (Kg/m³)

CA= concentrazione dell'inquinante nell'aria (Kg/m³)

H= costante di Henry (adimensionale)

I due metodi di deposizione umida sono:

- rainout: le nuvole, intese come aggregazione di cristalli di ghiaccio e/o goccioline di aerosol, inglobano le sostanze inquinanti che vengono poi rilasciate, a seguito di processi chimici, sotto forma di piogge acide.
- Washout: il processo di ablazione avviene all'esterno delle nuvole. In questo caso sono le precipitazioni che comportano una dilavazione dell'aria.

Com'è noto l'atmosfera contiene per sua natura, una seppur piccola, quantità di anidride carbonica che nel corso degli anni è andata vertiginosamente aumentando a causa delle attività umane: dall'inizio della rivoluzione industriale fino ad oggi è stato registrato un aumento del 30% di CO₂ che tuttora non appresta a fermarsi.

È conoscenza piuttosto diffusa l'utilità delle piante nella limitazione di tale aumento in quanto ne assorbono un'elevata quantità per la fotosintesi rilasciando ossigeno all'ambiente.

In realtà questa non è l'unica funzione svolta dalle piante, esse hanno anche una spiccata capacità di:

-assorbire sostanze inquinanti gassose;

-filtrare particolato solido, intercettare polveri, sedimentare le particelle, bonificare il terreno dai metalli pesanti;

-fissare batteri dall'aria;

-indicare la presenza di inquinanti;

Gli alberi hanno una duplice modalità di influenzare la qualità dell'aria: diretta e indiretta

Il metodo diretto consiste in una rimozione del particolato e degli inquinanti gassosi per assorbimento tramite gli stomi delle foglie e per adsorbimento tramite la cuticola

Invece il metodo indiretto consiste in una diminuzione della concentrazione degli inquinanti atmosferici in una determinata zona grazie alla modifica, da parte degli alberi, della velocità del vento e della turbolenza oltre che all'abbassamento della temperatura ambiente, provocato da ombreggiamento ed evapotraspirazione, che rallenta le reazioni chimiche di formazione degli inquinanti secondari, smog fotochimico compreso.

L'efficienza delle funzioni che possono svolgere le piante varia in funzione della luce, della temperatura, direzione del vento e precipitazioni (condizioni climatiche), dell'indice di area fogliare della pianta, della sua struttura, del suo tasso di crescita, della sua longevità, della densità e morfologia degli stomi, dello spessore e struttura della cuticola, delle proprietà fisico-chimiche degli inquinanti, e della resistenza della pianta agli inquinanti.

Da queste variabili è facile intuire che ad ogni specie è associata una diversa capacità di cattura delle polveri che generalmente è direttamente proporzionale alla rugosità e una differente propensione a ridurre gli inquinanti strettamente connessa alla velocità di deposizione e all'efficienza di cattura (Beckett et al. "Particulate pollution capture by urban trees: effect of species and windspeed" 2001): il secondo parametro è più elevato nelle conifere piuttosto che nelle latifoglie grazie alla loro maggiore superficie fogliare e complessità strutturale invece il primo parametro è maggiore negli alberi rispetto agli arbusti grazie alla chioma capace di generare movimenti turbolenti dell'aria.

Inoltre le piante, alcune specie più di altre, emettono i composti biogeni organici volatili BVOC che hanno un effetto differente a seconda dell'ambiente nel quale vengono rilasciati:

-puliscono l'atmosfera in assenza di Nox cioè in ambienti rurali;

-incrementano la concentrazione di ozono troposferico in presenza di alte concentrazioni di Nox (cioè in ambienti cittadini in quanto gli Nox sono prodotti dalle combustioni ad alte temperature tipiche del traffico veicolare).

Quindi è possibile individuare le corrette specie arborea da utilizzare in un determinato luogo e per un determinato scopo facendo riferimento alla loro capacità di assorbimento della CO₂, alla capacità di catturare il particolato e alla quantità di BVOC che emettono.

Per esempio, se lo scopo è ridurre l'ozono troposferico O₃ si preferiscono usare specie "a bassa emissione" di VOC in città.

Se invece si vuole procedere con la fissazione dell'anidride carbonica CO₂ si privilegiano piante longeve a basso mantenimento, crescita medio-veloce e che siano grandi a maturità;

Per ridurre i consumi di energia il tipo di pianta da utilizzare è diverso a seconda del clima: nei climi caldi si utilizzano piante decidue capaci di ombreggiare gli edifici e fare in tal modo risparmiare energia per il raffreddamento; al contrario nei climi freddi si utilizzano le piante sempreverdi che riparano gli edifici dai venti freddi e quindi consentire un risparmio di energia per il riscaldamento.

Per quanto riguarda la rimozione delle polveri l'efficacia aumenta se la corteccia è squamosa e resinosa e le foglie sono ruvide, appiccicose, pelose oltre che piccole e strette in quanto più efficienti rispetto a quelle larghe (l'unica eccezione in cui è possibile usare specie a foglia larga in barriere vegetali è quando queste si trovano vicino strade polverose)

Generalmente le conifere sono più efficienti delle latifoglie ma indipendentemente dalla specie scelta, utilizzare file di alberi piuttosto che uno singolo permette di ripulire maggiormente l'aria dalle polveri, inoltre, un incremento della captazione si può ottenere utilizzando specie con chioma alta, densa e uniforme, preferibilmente sempreverdi in quanto hanno una durata maggiore del fogliame a crescita veloce ed elevata longevità.

Come per la riduzione dell'inquinamento acustico anche in questo caso l'efficienza del mitigamento è maggiore quanto più la specie arborea viene piantata in prossimità della sorgente inquinante, tale vicinanza è però sconsigliata se la pianta in questione è sensibile a un certo tipo di inquinante.

Come già detto la vegetazione può variare la velocità e la direzione del vento e questo impatta notevolmente sulla concentrazione degli inquinanti.

Nelle città, in assenza di vento, l'isola di calore urbana determina una brezza che muovendosi dall'esterno verso l'interno concentra l'inquinamento: in una situazione di questo tipo l'aggiunta di aree verdi specialmente concentriche e diffuse permette di abbassare la temperatura dell'aria e contemporaneamente ripulirla dagli inquinanti innescando brezze urbane che vanno dal verde al costruito.

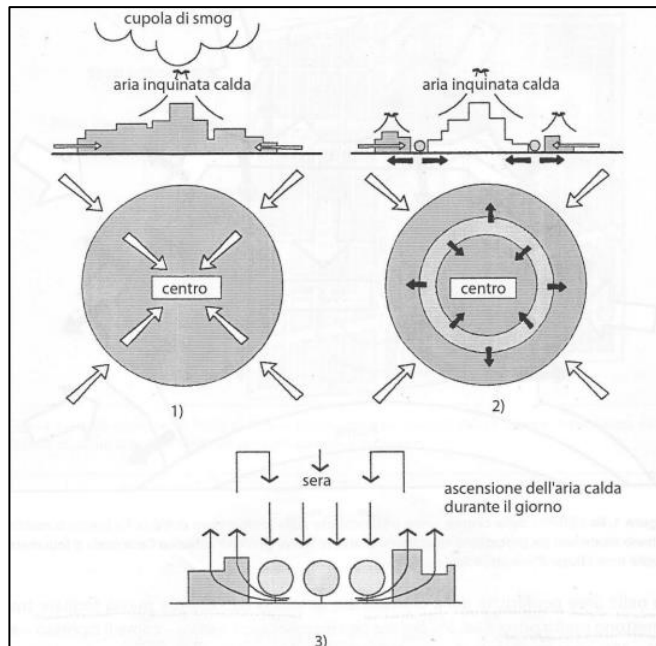


Figura 2.10 Schemi dei flussi d'aria in una struttura urbana in condizioni meteorologiche di assenza di vento e in assenza di verde (figura 1), in presenza di verde (figura 2) e durante l'arco di una giornata. ("Spazi verdi urbani" - G. Scudo, J.M.O de la Torre 2003)

Qualità dell'acqua e protezione del suolo (controllo della stabilità dei versanti e dell'erosione)

La vegetazione ricopre un ruolo importante nel miglioramento della qualità delle acque non solo per la sua capacità di intercettare le precipitazioni, garantire l'infiltrazione nel suolo e conseguentemente diminuirne il ruscellamento superficiale e lo scarico nei corpi d'acqua superficiali ma anche per la sua naturale capacità di depurare le acque reflue domestiche, agricole e industriali. Quest'ultima proprietà ha permesso di realizzare un sistema di depurazione naturale chiamato fitodepurazione.

Inoltre la vegetazione, con la sua struttura radicale e fogliare, esercita un'azione molto importante di protezione del suolo dall'erosione superficiale e dall'instabilità tipica dei suoli acclivi e dei versanti.

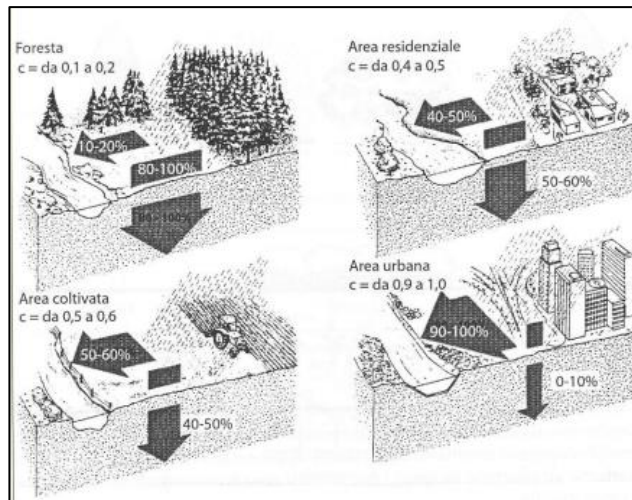


Figura 2.11 Diverse capacità di scorrimento/assorbimento della pioggia in funzione delle caratteristiche di permeabilità delle superfici. ("Spazi verdi urbani" - G. Scudo, J.M.O de la Torre 2003)

Conservazione della vita animale e produzione della biomassa

La vegetazione non solo è fondamentale per garantire un equilibrio idrogeologico ma anche ecologico: permette infatti lo sviluppo e il sostentamento della vita animale (insetti e vertebrati) la cui presenza è essenziale per la regolazione dell'ecosistema urbano secondo quanto stabilito dalla "Ipotesi di Gaia" teoria enunciata da James Lovelock nel 1969 e anticipata da Giovanni Keplero nel XVII secolo, secondo la quale tutti gli esseri viventi sulla Terra contribuiscono a comporre un unico organismo.

Infatti, è stato dimostrato che la perdita di biodiversità mette a repentaglio la sicurezza alimentare ed energetica oltre che la salute umana, diminuisce la capacità di fronteggiare i disastri naturali e riduce la disponibilità e la qualità delle risorse naturali.

Per questo è importante creare all'interno di un ambiente urbano spazi verdi a diversa scala connessi con "strade verdi" in modo da realizzare una rete ecologica ben connessa sia all'interno della città sia tra città e territorio (Malcevski et al. "Green Infrastructures and ecological reconstruction in urban and peri-urban areas" 2016).

La vegetazione oltre a fornire un luogo per lo sviluppo della biodiversità e a produrre cibo per il suo sostentamento produce, tramite il processo di fotosintesi clorofilliana, una elevata quantità di biomassa (utilizzabile per compostaggio, combustione o come materia prima).

Secondo quanto stabilito dalla legislazione comunitaria e nazionale sull'incentivazione delle fonti

rinnovabili (Direttiva 2001/77/CE e D.Lgs. 387/2003, modificati dalla Direttiva

2009/28/CE e D.Lgs. 28/2011), con il termine biomassa si intende "la frazione biodegradabile dei prodotti, rifiuti e residui di origine biologica provenienti dall'agricoltura (comprendente sostanze vegetali e animali), dalla silvicoltura e dalle industrie connesse,

comprese la pesca e l'acquacoltura, gli sfalci e le potature provenienti dal verde pubblico e privato, nonché la parte biodegradabile

dei rifiuti industriali e urbani”.

La biomassa rientra tra le fonti energetiche rinnovabili, quindi in quanto tale le pratiche dalle quali deriva hanno impatto ambientale trascurabile o nullo, ed è destinata a fini energetici o alla produzione di ammendante agricolo in quanto rappresenta una sofisticata forma di accumulo dell'energia solare.

I tre principali metodi che consentono di convertire biomassa in energia sono:

- Combustione
- Digestione anaerobica
- Gassificazione

Funzione socioeconomica

Ultima ma non meno importante è la funzione socioeconomica che comprende la capacità di:

-incrementare il benessere psico-fisico della popolazione in quanto combatte depressione e stress e favorisce le occasioni di aggregazione sociale;

-incrementare il benessere visivo in quanto la vegetazione rappresenta un'efficace strategia di arredo urbano che permette di valorizzazione aree con elevato valore storico-architettonico e schermare altre degradate;

-diminuire i consumi energetici per la climatizzazione degli edifici;

-incrementare il valore economico delle aree urbane e degli immobili;

- favorire le attività economiche grazie alla vicinanza di spazi verdi in prossimità delle aree commerciali;

È importante però specificare che ogni nuova piantumazione deve essere accompagnata da un'attenta pianificazione in quanto in caso contrario la vegetazione potrebbe essere causa di un incremento del degrado paesaggistico. Proprio per il consistente lavoro che ruota attorno alla realizzazione di una nuova area urbana i costi ad essa connessi sono importanti e legati non solo alla progettazione delle stesse ma anche e soprattutto ad un'attenta e sistematica gestione e manutenzione operazioni che vengono eseguite sulla base di quanto stabilito dal Piano del Verde di cui ogni amministrazione è tenuta a dotarsi.

Infine l'efficacia di quanto realizzato viene valutata tramite il calcolo del PMV (Predicted Mean Vote) e altri parametri di comfort termico che consentono di quantificare il benessere dei cittadini all'interno di spazi urbani.

2.3 Tipologia di verde urbano

Per i vantaggi che la vegetazione riesce a fornire essa viene ampiamente utilizzata all'interno dell'ambiente urbano come strumento di mitigazione sottoforma di:

- parchi urbani
- parcheggi verdi
- viali alberati
- aree gioco
- orti urbani
- tetti verdi

Parchi urbani

È stato ampiamente dimostrato che le aree verdi riescono ad alleviare lo stress termico urbano e a migliorare il comfort ambientale esterno grazie alla loro capacità di fornire ombra e di innescare e prolungare il fenomeno dell'evapotraspirazione.

Secondo alcuni studi, basati sull'utilizzo di dati meteorologici e le immagini satellitari, effettuati da Oke (1989), Jauregui (1990-1991), Saito et al (1990-1991) e Spronken-Smith (1994) rispettivamente in Canada, Messico, Giappone e Nord America il raffrescamento che riesce a garantire un parco si estende oltre i suoi confini per una distanza pari all'ampiezza del parco. La dimensione del parco incide non solo sull'estensione del raffrescamento all'interno dell'area urbana ma anche sull'efficacia del raffrescamento definita dalla differenza tra la temperatura del parco e quella del centro abitato.

Altri studi hanno dimostrato che non solo la dimensione del parco ma anche le condizioni climatiche (temperatura, umidità e velocità del vento), l'ora del giorno e il fattore di vista del cielo (SVF) sono variabili che possono incidere sulla mitigazione del clima da parte della vegetazione.

Per esempio, Spronken-Smith e Rachel A. con il loro studio "Energetics and cooling in urban parks" (1994) sono arrivati alla conclusione che in una città con clima temperato l'effetto del raffrescamento dovuto al parco è di 5-4°C inferiore rispetto a quello provocato da un parco in una città calda e secca. Lo stesso ha dimostrato Jauregui con il suo studio "Influence of a large urban park on temperature and convective precipitation in a tropical city" (1990-1991) condotto a Città del Messico dove la temperatura misurata a Parco Chapultepec (circa 500 ha) è risultata inferiore di 4,0 °C rispetto alle zone circostanti alla fine della stagione secca (aprile), mentre durante i mesi umidi (luglio) è risultata più bassa di solo 1 °C

Secondo Victor L. Barradas durante la stagione secca l'effetto di raffreddamento offerto dalla vegetazione potrebbe non essere significativo a causa della mancanza di sufficiente

evapotraspirazione dovuto a una scarsa disponibilità idrica e alla fenologia delle piante (The Urban Tree as a Tool to Mitigate the Urban Heat Island in Mexico City: A Simple Phenomenological Model 2016).

Sempre secondo Spronken-Smith e Rachel A. per massimizzare il raffreddamento, la larghezza del parco dovrebbe essere almeno 7,5 volte l'altezza degli alberi o degli edifici presenti attorno al confine del parco perché una tale estensione permette di aumentare il volume di aria raffreddata e contemporaneamente consente l'avvezione di aria fresca nel quartiere.

Al contrario uno studio condotto da Honjo e Takakura (1990-1991) in Giappone, tramite l'utilizzo di un modello numerico, afferma che per la mitigazione dell'isola di calore urbana sono preferibili piccole aree verdi purché adeguatamente distanziate (più di 300 m) anziché un'unica area di elevata estensione.

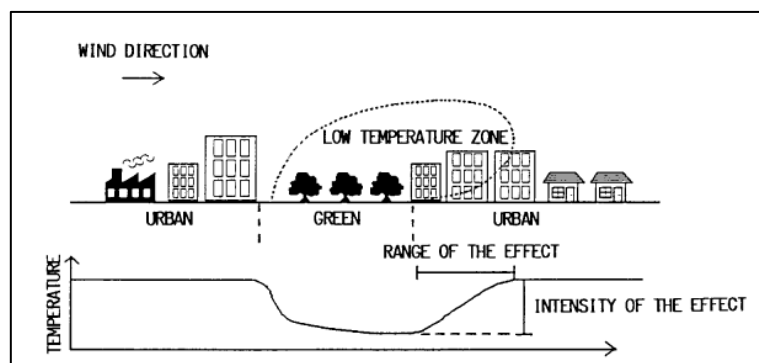


Figura 2.12 Intensità e range dell'effetto di raffreddamento di un'area verde urbana (Honjo e Takakura "Simulation of Thermal Effects of Urban Green Area on their Surrounding Areas" 1991)

Questa affermazione è stata successivamente confermata da F. Kong et al. nello studio effettuato a Nanchino, in Cina intitolato "Effects of spatial pattern of greenspace on urban cooling in a large metropolitan area of eastern China" (2014).

Oke all'interno dell'articolo "The Micrometeorology of the Urban Forest" (1989) riporta i risultati di uno studio condotto a Montreal riguardo il raffrescamento generato dal verde urbano secondo il quale per una velocità del vento maggiore di 6 m/s l'effetto di raffreddamento risulta essere trascurabile.

Tutti gli studi appena citati hanno permesso di dimostrare che sia di giorno sia di notte i parchi si raffreddano più rapidamente delle circostanti zone urbane: secondo Spronken-Smith (1994) di notte il motivo principale di tale raffreddamento è il trasferimento radiativo e solo in secondo luogo l'evaporazione e la trasmittanza termica; Brundl et al. (1986) e Saito et al. (1990), hanno invece dimostrato che di giorno il maggiore abbassamento della temperatura nei parchi rispetto alle altre aree è dovuto principalmente all'ombreggiamento degli alberi mentre il processo di evaporazione diventa meno importante rispetto a quanto lo è di notte.

La differente velocità di raffreddamento che si registra tra i parchi e le aree urbane è stata portata alla luce anche dallo studio “Reductions in air conditioning energy caused by a nearby park” condotto da Vu Thanh Ca et al. a Tama New Town, una città sita nella parte occidentale dell'area metropolitana di Tokyo, in Giappone. Le osservazioni hanno indicato che la vegetazione oltre a comportare una temperatura superficiale del manto erboso inferiore di 19°C rispetto a quella di una superficie asfaltata e di 15°C rispetto a quella di una in cemento implica anche una temperatura dell'aria, misurata a 1,2 m dal suolo, di oltre 2°C inferiore nel manto erboso del parco rispetto alle aree commerciali e di parcheggio circostanti. Inoltre, il fatto che subito dopo il tramonto la temperatura della superficie del terreno nel parco si abbassa più velocemente rispetto quella delle superfici di asfalto o cemento della città comporta la nascita di un “isola fresca” anche detta “oasi fresca” nel parco che permette di ridurre fino a 1,5 °C la temperatura dell'aria in un'area commerciale trafficata 1 km sottovento. Questo può portare svariati vantaggi, tra cui soprattutto un'importante diminuzione dell'energia usata per il condizionamento. (circa 4000 kWh dalle 13:00 alle 14:00).

Kawahsima “Relation between vegetation, surface temperature, and surface composition in the tokyo region during winter” (1994) ha studiato, durante limpide giornate invernali, gli effetti della densità della vegetazione sulle temperature superficiali nelle aree urbane e rurali di Tokyo evidenziando un effetto della vegetazione sulla riduzione della temperatura minore nelle prime rispetto che nelle seconde.

Questo è dovuto al fatto che l'effetto della vegetazione sulla temperatura superficiale dipende dalla proporzione tra la percentuale di superficie edificata e quella di superficie boschiva: nelle aree in cui la superficie edificata è dominante rispetto a quella boschiva, l'aumento della vegetazione, non comporta un abbassamento importante della temperatura superficiale di giorno al contrario di quanto avviene di notte e questo comporta un aumento dell'escursione termica diurna

Al contrario nelle aree in cui la superficie boschiva è dominante rispetto a quella edificata l'aumento della vegetazione abbassa notevolmente la temperatura superficiale di giorno e poco di notte quindi l'escursione termica diurna diminuisce.

Limor Shashua-Bar et al. nello studio pubblicato nel 2010 intitolato “Microclimate modelling of street tree species effects within the varied urban morphology in the Mediterranean city of Tel Aviv, Israel” pongono l'attenzione sul ruolo predominante degli alberi nell'attenuazione dell'isola di calore urbana e la sua dipendenza dal livello di copertura offerto dalla chioma oltre che dalla densità e geometria del costruito.

Infine, H. Upmanis et al. nella ricerca “The influence of green areas on nocturnal temperatures in a high latitude city (Göteborg, Sweden)” hanno evidenziato quanto una differente ostruzione del cielo da parte delle piante (ossia un differente SVF) può provare una diversa entità e velocità di raffreddamento.

Parcheeggi Verdi:

Hideki Takebayashi e Masakazu Moriyama con lo studio intitolato: “Study on the urban heat island mitigation effect achieved by converting to grass-covered parking” sono arrivati alla conclusione che la conversione dei parcheggi asfaltati in aree erbose comporta una riduzione del flusso di calore sensibile di circa 100–150 W/m² durante il giorno e circa 50 W/m² durante la notte e un abbassamento della temperatura dell’aria di circa 0,1°C che secondo Ca et al. può arrivare anche a 2°C (differenza della temperatura tra parcheggio in cemento e in erba misurata a 1,2m dal suolo). Infine, sempre secondo Ca et al. la riduzione massima della temperatura superficiale registrata a Tama New Town, Giappone, in una giornata estiva a mezzogiorno a seguito della sostituzione di un parcheggio in cemento con uno verde è di 15 °C. (“ Reductions in air conditioning energy caused by a nearby park” 1998)

Onishi A. et al tramite uno studio (“Evaluating the potential for urban heat-island mitigation by greening parking lots” 2010) condotto a Nagoya in Giappone hanno permesso di valutare il potenziale di mitigazione dei parcheggi verdi mettendo in relazione la temperatura superficiale terrestre (LST) con l’uso del suolo/copertura del suolo (LULC) tramite modelli di regressione lineare multivariata.

I risultati mostrano che diversi tipi di LULC hanno un impatto diverso a seconda delle stagioni mostrando un abbassamento maggiore dell LST in primavera/estate con una diminuzione massima di 7,26° registrata in estate per un singolo parcheggio a seguito della piantumazione di erba sulla sua superficie.

Per tale motivo sta prendendo piede sempre di più l’idea di un restyling dei parcheggi, i cosiddetti “parcheggi verdi”: per far ciò è importante tenere in considerazione l’aspetto del parcheggio, il tipo di pianta da utilizzare, la crescita dell’erba, gli effetti del peso di un’auto e del calore irradiato dal suo motore, i costi di costruzione e di manutenzione.

La riprogettazione di un parcheggio con la finalità di un inverdimento comporta la necessità di ridurre il numero di posteggi a favore di pavimentazioni permeabili oltre che di valutare l’orientamento dei posti auto in relazione ai punti cardinali per ottimizzare l’ombreggiamento generato dagli alberi e di preferire all’asfalto l’utilizzo di materiali permeabili o semi-permeabili (prato, ghiaia inerbata, grigliato erboso in plastica riciclata e in calcestruzzo, massello drenante e pavimentazioni in calcestruzzo permeabile) per le aree di sosta e per i percorsi carrabili e pedonali.

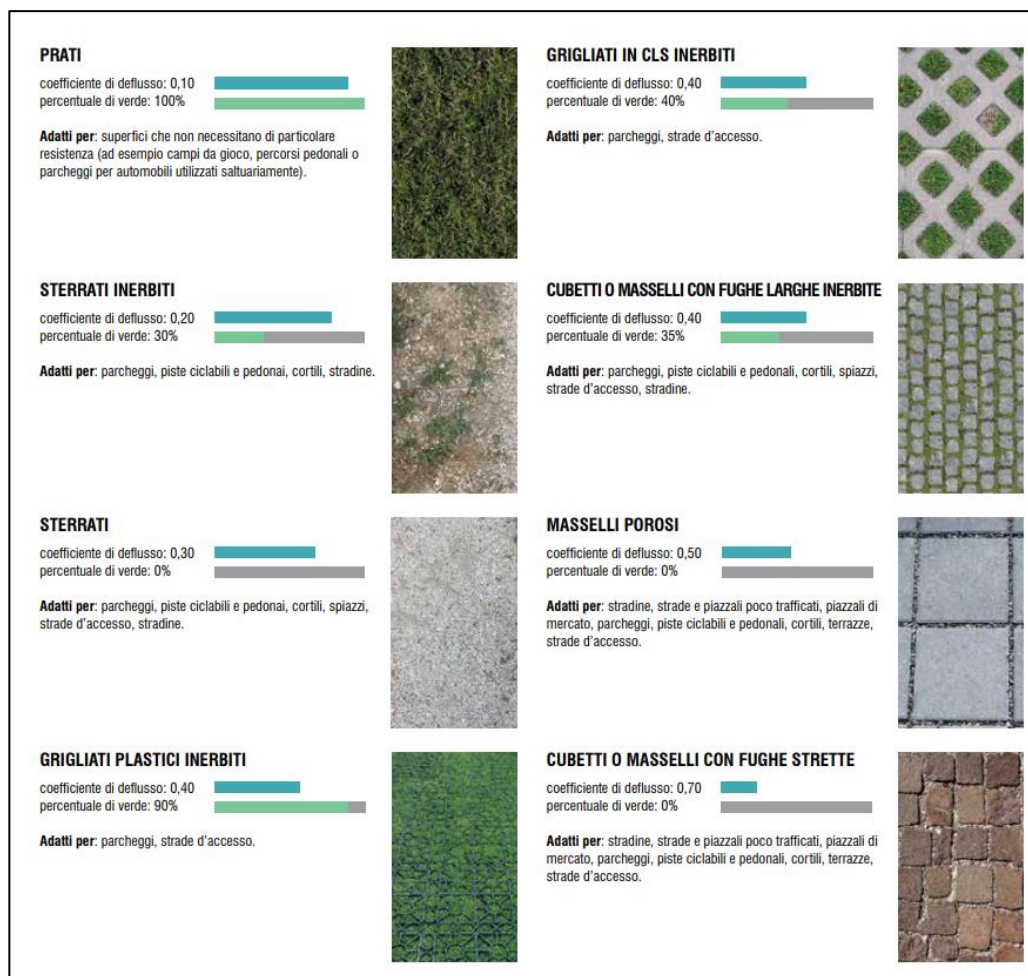


Figura 2.13 Tipi di pavimentazioni permeabili e semi-permeabili con coefficiente di deflusso, percentuale di verde e principali usi (“Linee guida per la gestione sostenibile delle acque meteoriche Provincia autonoma di Bolzano”)

Non di secondaria importanza è la scelta del tipo di albero da utilizzare: si preferiscono specie con chioma ampia, legno resistente, prive di frutti pesanti, maleodoranti o che attirino uccelli e che non provochino infestazioni o caduta di materiale vischioso e imbrattante.

Attraverso questi accorgimenti si ottiene un parcheggio con un più alto indice di comfort oltre che un ambiente urbano più accogliente ed esteticamente più apprezzabile dai cittadini.

I vantaggi che possono apportare i parcheggi verdi sono, oltre ad un aspetto più gradevole che favorisce le occasioni di aggregazione per i cittadini, una riduzione delle emissioni di CO₂, una diminuzione dell’isola di calore urbana e un miglioramento del deflusso superficiale dell’acqua piovana.



Figura 2.14 Particolare riguardante l'alternanza di pavimentazioni drenanti PLATdesign, NSE Kitakyushu Technology Center, Giappone, Fukuoka, 2011 (<http://landezine.com/index.php/2013/01/nse-kitakyushu-technology-center-by-platdesign/>)



Figura 2.15 Particolare di grigliato in calcestruzzo inerbito: pavimentazione permeabile Venlo Talentencampus (Paesi Bassi) Carve Landscape (<https://landezine.com/venlo-talentencampus-by-carve-landscape-architecture/>)

Uno studio condotto durante l'estate del 2019 (in condizioni climatiche calde e secche) da R. Bouzouidja et al. "Experimental Comparative Study between Conventional and Green Parking Lots: Analysis of Subsurface Thermal Behavior under Warm and Dry Summer Conditions" ha permesso di distinguere i parcheggi in tre tipologie mediante l'analisi, tramite sonde termiche, del loro comportamento termico.

-parcheggio asfaltato: elevata temperatura superficiale durante il giorno e moderata durante la notte, importante trasferimento di calore verso i substrati e basso spostamento temporale;

-parcheggio lastricato: temperatura superficiale alta durante il giorno, bassa durante la notte, debole trasferimento di calore verso i substrati e importante spostamento temporale;

-parcheggio verde: bassa temperatura superficiale durante il giorno e la notte, debole trasferimento di calore verso i substrati e importante spostamento temporale.

I risultati di tale studio mostrano che tanto meno minerale viene utilizzato nel rivestimento superficiale della pavimentazione, tanto meno essa si riscalda; è stata misurata una differenza tra la temperatura superficiale di un parcheggio con rivestimento minerale rispetto ad uno con rivestimento non minerale di circa 10 °C. Questo permette di concludere che la tipologia di parcheggio in asfalto è la meno appropriata perché raggiunge rapidamente temperature molto elevate e trasmette calore agli strati più profondi del suolo, il parcheggio in cemento è una via di mezzo perché, come il precedente si riscalda rapidamente e raggiunge temperature elevate però

si raffredda anche molto rapidamente non accumulando calore. Senza dubbio la soluzione migliore è rappresentata dai parcheggi verdi, caratterizzati da terreno erboso e soletta riempita con una miscela di terra e sabbia o riempita con trucioli di legno il cui comportamento termico è molto prossimo a quello del terreno naturale.

Viali alberati:

Le strade hanno da sempre ricoperto un'importanza fondamentale in quanto consentono la mobilità delle persone e delle merci, nel corso degli anni hanno subito delle modifiche a causa del crescente traffico veicolare e della maggiore necessità di parcheggi che di conseguenza hanno ridotto sempre di più la percentuale di vegetazione presente in loro prossimità.

Oggi, data la sempre maggiore richiesta di spazi urbani salubri e piacevoli che bene si adattino a forme di mobilità sostenibili (camminare, pedalare etc.) vi è un'urgente necessità di ripensare l'architettura stradale arricchendola di alberi, arbusti, aiuole e altri esemplari che costituiscono i cosiddetti filari arborei.

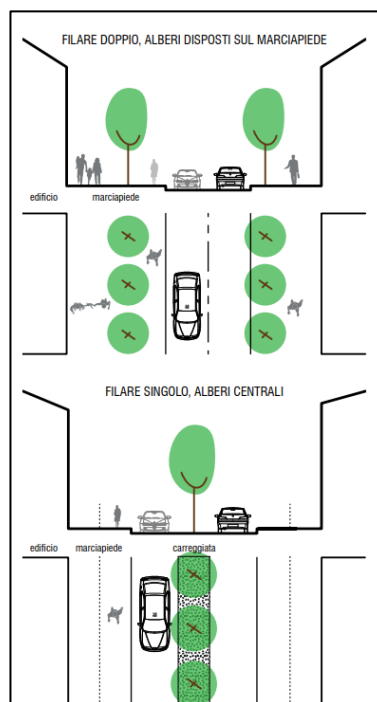


Figura 2.16 Possibili disposizioni dei filari alberati (Piano del Verde del Comune di Padova)

Un'attenzione particolare va posta nella scelta delle specie da utilizzare le cui caratteristiche principali devono essere: robustezza, solidità strutturale, resistenza alle malattie, apparato radicale che non si sviluppi in superficie e che abbia uno spazio sufficiente per potersi estendere e un terreno in grado di garantire adeguata permeabilità e arieggiamento e allo stesso tempo capacità di ritenzione idrica. Le specie utilizzate devono inoltre essere diversificate il più possibile in modo da favorire stabilità biologica e scongiurare malattie e parassiti.

Questo consente di creare spazi che involino al movimento e all'incontro, che contrastino l'inquinamento atmosferico, regolino il clima e il ciclo dell'acqua e arricchiscano la biodiversità.



Figura 2.17 Constitution Avenue, Canberra (Australia). Jane Irwin Landscape Architecture (<https://landezine.com/constitution-avenue-canberra-by-jane-irwin-landscape-architecture/>)

Aree gioco:

Al pari dei parchi urbani, dei parcheggi verdi e dei viali alberati anche le aree gioco per i bambini possono essere considerate un esempio di verde ricreativo presente all'interno di un contesto urbano che consentono ad un ampio spettro di popolazione non solo di affinare le loro capacità motorie e relazionali ma anche di cominciare ad interagire con la natura sin dalla più giovane età.

Anche le aree gioco sono interessate da una continua evoluzione incentivata dalle crescenti e sempre nuove richieste ed esigenze dei più giovani e di chi li accompagna.

Per questo negli ultimi anni c'è stato un ripensamento anche della progettazione di tali spazi nonché un rinnovo dei materiali e delle attrezzature utilizzate sempre con l'obiettivo principale di porre al centro l'importanza della vegetazione.

La progettazione delle nuove aree ludiche o le modifiche di quelle esistenti sono guidate dalle seguenti normative: EN 1176 "Attrezzature e superfici per aree da gioco", EN 1177 "Rivestimenti di superfici di aree da gioco", UNI 11123:2004 "progettazione dei parchi e aree da gioco all'aperto"

Le piante ornamentali da inserire in tali spazi devono essere tali da non costituire un pericolo per i bambini che tendono a giocare con la vegetazione, quindi bisogna evitare piante pericolose, velenose, con spine o che possono creare allergie.



*Figura 2.18 Un esempio di un'area giochi (a Tortona) con pavimentazione antitrauma e con vegetazione.
(www.proludic.it)*

Orti urbani:

Un orto urbano è uno spazio verde di dimensione variabile di proprietà del comune che ne assegna la gestione, tramite appositi bandi, o ai singoli cittadini o ad Associazioni/Enti.

Anche la realizzazione di orti urbani sta prendendo sempre più piede. Secondo i dati forniti dal rapporto ISTAT sul verde urbano 2021, in Italia in pochi anni c'è stata una crescita degli orti urbani del 18,5% tanto che ad oggi occupano più di 2,1 milioni di metri quadrati. La loro riscoperta importanza è dovuta al fatto che permettono la valorizzazione degli spazi verdi cittadini oltre ad offrire la possibilità di produrre una parte del proprio fabbisogno alimentare quotidiano.

Solitamente la progettazione di un orto urbano segue le direttive presenti nel Regolamento Comunale e prevede una suddivisione dell'area in lotti destinati alla coltivazione circondati da zone piantumate con prato, arbusti e alberi per migliorare il comfort ambientale e arricchire la biodiversità, il tutto opportunamente recintato con ingresso sia pedonale sia carrabile per l'entrata di mezzi utili alla manutenzione ordinaria. Tutti i manufatti e gli elementi d'arredo, presenti all'interno

dell'area, dovrebbero essere esteticamente adeguati al luogo e realizzati con materiali omogenei (tavoli, panche, sedie amovibili, pergolati, ricovero attrezzi, compostiera).

Infine, le pavimentazioni al suo interno devono essere realizzate in materiali permeabili (calcestruzzo, ghiaia, terra battuta).

Ovviamente di importanza non marginale è anche la vicinanza di tali aree con fonti/sorgenti/reti idriche di distribuzione dell'acqua. (acquedotti)



Figura 2.19 Orti fioriti di City Life-Milano (<https://www.orticola.org/?p=9947>)

Tetti Verdi:

Un tetto verde, anche detto tetto giardino o green roof, è una copertura piantumata che, al contrario del classico tetto in coppi o guaina impermeabilizzata, garantisce l'infiltrazione, la trattenuta dell'acqua e quindi l'innesco del processo di evapotraspirazione che le consente di raggiungere una temperatura inferiore.

Per i benefici termici che apportano sia agli edifici nei quali vengono realizzati sia agli ambienti circostanti i tetti verdi sono stati ampiamente studiati da diversi ricercatori: Teemusk e Mander ("Greenroof potential to reduce temperature fluctuations of a roof membrane: A case study from Estonia" 2009) hanno dimostrato che in estate i greenroof registrano un aumento di temperatura inferiore rispetto ai tetti tradizionali mentre in autunno e in inverno il substrato presente in un tetto verde permette di ritardare raffreddamento e congelamento fornendo contemporaneamente un efficace isolamento termico questo comporta un risparmio del consumo energetico di 0.6-14.5% come dimostrato dallo studio condotto da Wong et al., ("The effects of rooftop garden on energy consumption of a commercial building in Singapore" 2003).

Brad Bass et al. nell'esplorare il ruolo dei tetti verdi nel mitigare l'effetto isola di calore urbana a Toronto (2000) hanno osservato una riduzione della temperatura di 0,5 °C in seguito alla copertura con tetti verdi del 5% dell'area totale della città. Sempre secondo questo studio l'impatto dei tetti verdi è tanto maggiore quanto più alta è la densità dell'area urbana ("Mitigating the Urban Heat Island with Green Roof Infrastructure").

Nonostante il pensiero comune secondo il quale i tetti verdi possono essere considerati una soluzione moderna al problema dell'isola di calore urbana, degli allagamenti e altri problemi climatici, in realtà sono stati utilizzati fin dall'antichità, anche se la tecnica di realizzazione è stata affinata solo successivamente permettendo di eliminare problemi di

infiltrazioni, infestazioni di animali e garantendone una maggiore durabilità e garantendone una veloce diffusione.

Oltre a permette una mitigazione dell'isola di calore urbana, un altro vantaggio delle coperture a verde è quello della diminuzione dell'acqua di dilavamento a seguito di un evento meteorologico intenso che grazie al verde pensile viene immessa in impianti d'infiltrazione o in canalizzazioni.

La normativa di riferimento è la UNI 11235-2015 "Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione, il controllo e la manutenzione di coperture a verde" che definisce "i criteri di progettazione, esecuzione, controllo e manutenzione di coperture continue a verde, in funzione delle particolari situazioni di contesto climatico, di contesto edilizio e di destinazione d'impiego".

All'interno della norma viene anche definita la stratigrafia tipica di un tetto verde i cui elementi costituenti imprescindibili sono:

- elemento portante;
- elemento impermeabile di tenuta dell'acqua che previene il degrado dello strato sottostante;
- elemento anti-radice che previene il degrado dello strato sottostante;
- elemento di protezione meccanica;
- elemento drenante che assorbe l'acqua in eccesso dallo strato di terreno sottostante;
- elemento filtrante che trattiene il terreno di coltura mentre consente il passaggio dell'acqua piovana;
- terreno di coltura;
- strato di vegetazione: il tipo di vegetazione utilizzata dipende dallo spessore del terreno di coltura, l'entità dei carichi sopportabili dal solaio e la frequenza della manutenzione.

Esistono due tipologie di tetti verdi:

- Tetti verdi estensivi: sono caratterizzati da specie arboree con altezza e peso limitato, resistenti alle intemperie che richiedono scarsa manutenzione. Solitamente vengono utilizzati in copertura di grandi estensioni (capannoni industriali, centri commerciali) sia piane sia inclinate e non sono fruibili.

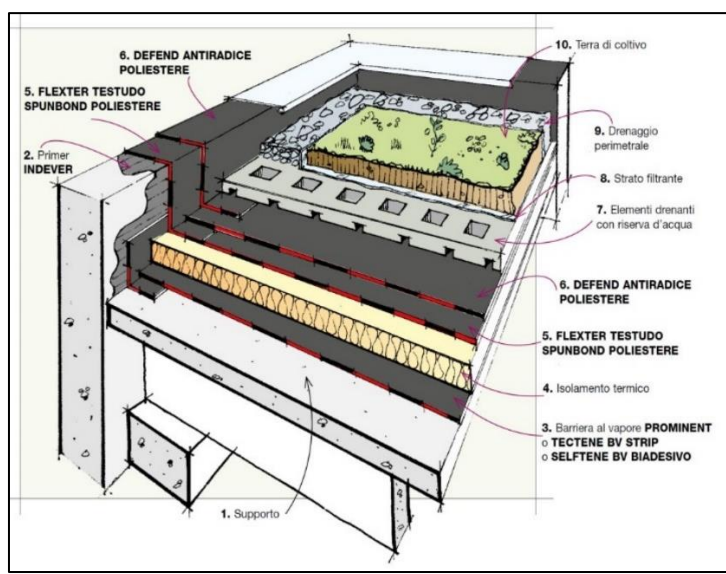


Figura 2.20 Stratigrafia tetto verde intensivo (<https://prodottiesoluzioni.indexspa.it/>)

- Tetti verdi intensivi: il loro aspetto è molto simile a quello di un parco costituito da una grande varietà di vegetazione: prato, cespugli, alberi e per questo motivo lo strato di terreno di coltura è maggiore.

Richiedono una maggiore manutenzione e irrigazione oltre che un maggior costo per l'installazione.

Possono essere utilizzate in tetti di abitazioni, terrazzi e garage e sono fruibili.

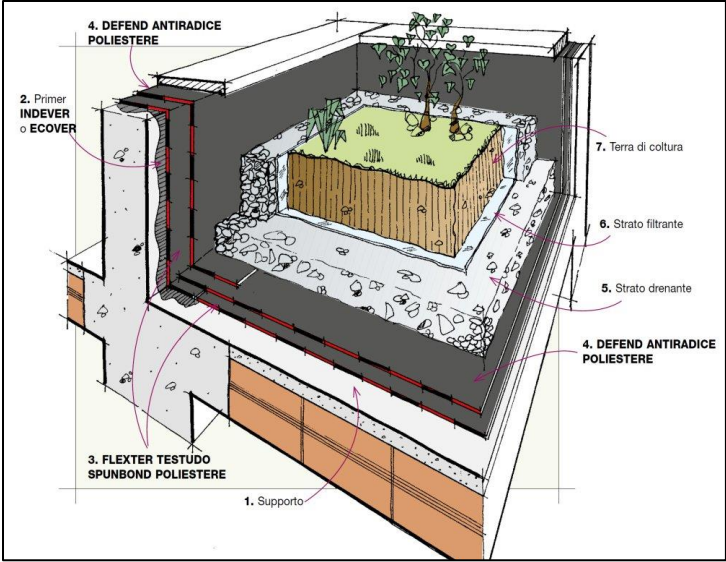


Figura 2.21 Stratigrafia tetto verde intensivo (<https://prodottiesoluzioni.indexspa.it/>)

Indipendentemente dalla tipologia scelta i vantaggi che apportano sono i medesimi: mitigazione del microclima, risparmio energetico grazie all'isolamento termico che riescono a garantire, riduzione dell'inquinamento atmosferico e sonoro, riduzione della velocità di deflusso delle acque, crescita della biodiversità, miglior rendimento dei pannelli fotovoltaici in copertura.

La temperatura superficiale di un tetto verde in estate raggiunge i 25-30°C mentre quella di un tetto tradizionale può arrivare ad 80°C (dati forniti da Ambiente Italia).

Per quanto riguarda la temperatura dell'aria la differenza tra quella nelle vicinanze di un tetto verde e quella in prossimità di un tetto senza vegetazione è stato dimostrato da Peng e Jim essere di circa 2-5°C (“Green-roof effects on neighborhood microclimate and human thermal sensation”). Questi ultimi hanno posto l'attenzione anche sulla diversa riduzione della temperatura dell'aria a livello dei pedoni provocata da un tetto estensivo (meno 0,4–0,7°C) e da uno intensivo (meno 0,5–1,7°C) in entrambi i casi la massima riduzione si ottiene in centri urbani con bassi edifici e bassa densità.

In conclusione la vegetazione è un'ottima tecnica di mitigazione dell'isola di calore urbana, ma la sua efficacia varia a seconda della tipologia di vegetazione utilizzata.

Infatti è stato dimostrato dalla tesi “Simulazione del microclima urbano di Milano mediante il software ENVI-met” condotta da Marta Bisson che l'introduzione di tetti verdi comporta variazioni termiche inferiori (0,5°C) rispetto a quelle apportate dall'utilizzo di aree verdi a terra (0,25-1,5°C fino ad un massimo di 3°C).

Per ottenere tale risultato sono state condotte delle simulazioni su dei modelli ideali rappresentativi di un sistema urbano modulare e semplificato, ipotetico e verosimile, ma non reale:

- 4 modelli per l'analisi degli effetti delle coperture verdi
- 4 modelli per l'analisi degli effetti di aree verdi

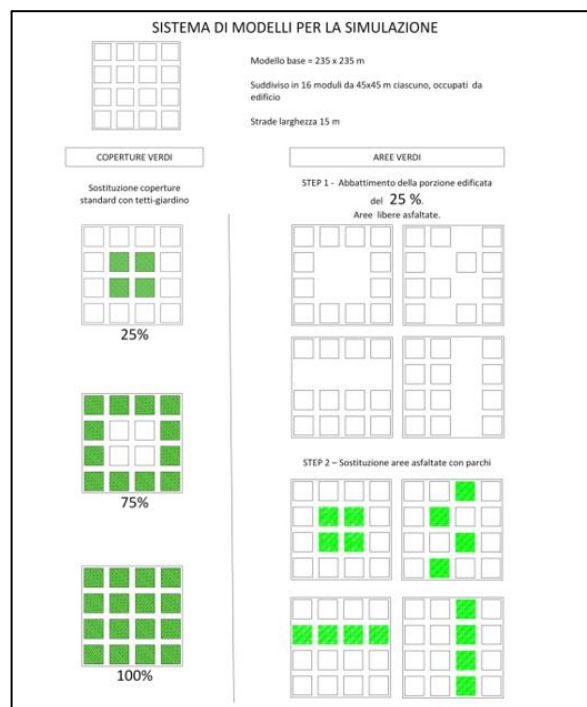


Figura 2.22 Schema di modelli per la simulazione (“Simulazione del microclima urbano di Milano mediante il software ENVI-met” Marta Bisson)

Questo lavoro di tesi è un esempio di studio in cui si pone l'attenzione sulle sollecitazioni che l'edificio subisce, altri studi si concentrano invece sul confort ambientale dei cittadini o ancora sulle conseguenze e gli interventi per la mitigazione dell'isola di calore urbana.

Per esprimere come varia la sollecitazione termica degli edifici presenti nell'area di interesse a seguito della variazione di uno dei parametri tra: porzione di edifici presenti, vegetazione nell'area sottoforma di coperture verdi o di parchi, distribuzione delle aree libere adibite a parcheggi o a spazi verdi e direzione del vento si è scelto di far riferimento al valore della temperatura potenziale dell'aria.

Un risultato degno di nota è quello ottenuto mediante le simulazioni fatte sui quattro modelli per l'analisi degli effetti delle coperture verdi: l'introduzione di tetti-giardino porta benefici termici soprattutto nello spazio sovrastante la copertura stessa; questo è facile notarlo dal grafico x-y delle Figura in cui si ha un decremento della temperatura tanto più evidente quanto più aumenta la quota. Per questo motivo in un ambiente urbano è preferibile realizzare edifici con altezze il più possibile diversificate, in quanto la modifica della copertura degli edifici più bassi potrebbe comportare un vantaggio non solo per l'edificio in questione ma anche per quelli circostanti più alti e quindi un beneficio termico che ricopre un'area urbana più ampia.

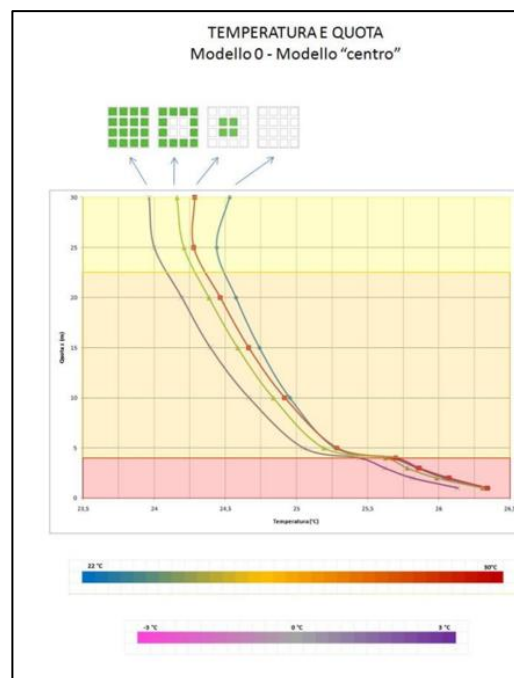


Figura 2.23 Analisi della temperatura in funzione della quota (“Simulazione del microclima urbano di Milano mediante il software ENVI-met” Marta Bisson)

I motivi che rendono la scelta dei tetti verdi meno adatta rispetto a quella delle aree verdi sono: l'impossibilità di sfruttare l'ombreggiamento sulle pareti verticali oltre che di diffondere aria fresca a diverse quote e su ampie aree.

Il beneficio dei tetti verdi è riscontrabile solo quando questi vengono applicati su un'ampia area urbana e su edifici di altezza diversificata.

Sempre da grafico precedente è facile notare che la diversa distribuzione delle coperture giardino (centro, contorno totale) non comporta differenze notevoli, soprattutto alle basse

altezze anche se è evidente un graduale aumento dell'effetto di raffreddamento all'aumentare della percentuale di tetti verdi.

Dall'analisi condotta per valutare gli effetti delle aree verdi si è invece giunti alla conclusione che è più vantaggioso concentrare le aree verdi in un'unica zona al centro della zona urbana anziché disporle in modo alternato agli edifici, infatti, in tal caso il beneficio termico che si otterrebbe sarebbe minore anche se diffuso in un'area maggiore e in maniera più omogenea. In entrambi i casi è favorita la ventilazione notturna e quindi la riduzione della richiesta di energia per il raffrescamento.

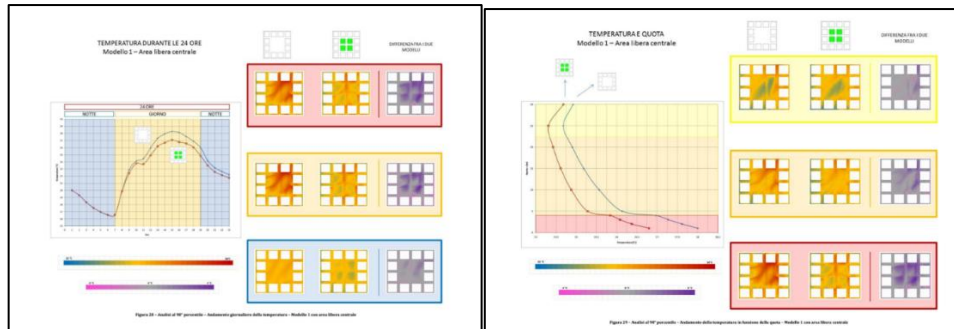


Figura 2.24 Andamento giornaliero della temperatura e della temperatura in funzione della quota per il Modello 1 (Marta Bisson, "Simulazione del microclima urbano di Milano mediante il software ENVI-met")

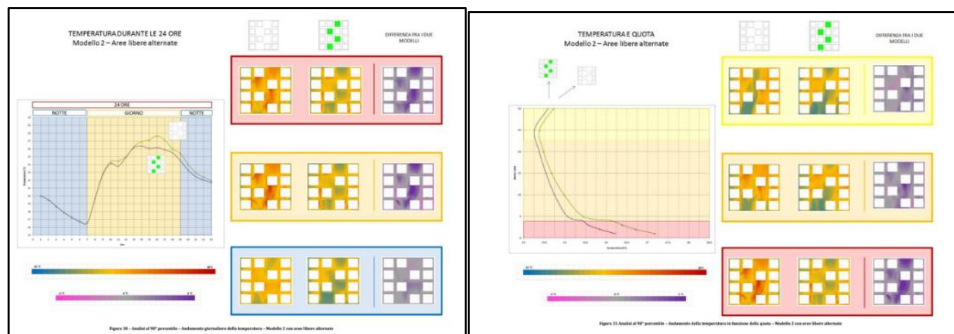


Figura 2.25 Andamento giornaliero della temperatura e della temperatura in funzione della quota per il Modello 2 (Marta Bisson, "Simulazione del microclima urbano di Milano mediante il software ENVI-met")

Capitolo 3

FUNZIONAMENTO DEL SOFTWARE ENVI-met

3.1 Introduzione

ENVI-met è un software di simulazione ambiente e microclimatica, sviluppato dal ricercatore tedesco Michael Bruse del Gruppo di Modellazione Ambientale dell'università di Mainz, utilizzato per la modellizzazione tridimensionale di aree urbane con lo scopo di comprendere le interazioni fra gli elementi presenti al loro interno (edifici, superfici, vegetazione) e i flussi di aria e di energia sotto determinate condizioni climatiche al contorno, oltre che di ottenere informazioni relative alla qualità dell'aria. Il vantaggio di ENVI-met rispetto ad altri software è che riesce a combinare i processi microclimatici (temperatura dell'aria, umidità relativa, vento e radiazione solare) con la fisica degli edifici e la morfologia urbana in modo da ottenere informazioni climatiche che siano in relazione ai processi termici che coinvolgono gli edifici e al confort termico delle persone.

La migliore completezza e attendibilità del software ENVI-met rispetto ai suoi concorrenti, nell'analisi ambientale urbana è stata dimostrata da uno studio condotto da Vidmar et al. ("Evaluation of simulation tools for assessment of urban form based on physical performance" 2013) nel quale sono stati messi a confronto tre programmi: ENVI-met, Project Vasari e IES VE-Pro. Il primo ha avuto la meglio sugli altri due risultando il più adatto per le simulazioni microambienti e quindi per lo studio dell'isola di calore urbana.

I vantaggi di tale software sono:

- possibilità di calcolare non solo gli effetti della vegetazione sulla temperatura ambiente ma anche sull'inquinamento (tramite il modulo di dispersione dell'inquinamento che consente di simulare il rilascio, la dispersione e la deposizione degli inquinanti oltre che le reazioni fotochimiche tra NO, NO₂ e O₃) e sul risparmio energetico degli edifici

- possibilità di calcolare gli indici di comfort ambientale di coloro che usufruiscono della zona presa in esame grazie a BIO-met

-fornisce risultati precisi e facilmente intuibili grazie alle due interfacce di output: Leonardo e Xtract

-possibilità di usufruirne gratuitamente

-velocità di calcolo

-semplicità e intuitività dell'interfaccia

A causa del cambiamento climatico sempre più preoccupante e del conseguente aumento delle condizioni metereologiche estreme, risulta necessario realizzare ambienti urbani sostenibili e quindi porre maggiore attenzione alla pianificazione urbana durante la quale un ruolo preponderante è ricoperto da tale software.

Il microclima urbano viene calcolato da ENVI-met tramite un metodo di calcolo deterministico chiamato SVAT (Soil, Vegetation and Atmosphere Transfer) che risolve le equazioni della termodinamica e quelle della fluidodinamica di Navier-Stokes utilizzando la fluidodinamica computazionale (CFD). Tale processo di calcolo elaborato da Michael Bruse comprende:

-determinazione, tramite il modulo Solar Access, dei flussi di radiazioni short wave (ultravioletto e visibile) e long wave (infrarosso) tenendo in considerazione ombreggiamento, riflessioni multiple tipiche dei canyon urbani e le radiazioni emesse da edifici, superfici e vegetazione

-determinazione dei flussi di calore sensibile legati all'evapotraspirazione

-calcolo delle temperature di pareti e superfici tenendo in considerazione l'eventuale presenza di verde su facciate e coperture

-simulazione completa dei fattori fisici delle piante (es. reazione di fotosintesi e suoi effetti)

-simulazione scambi termici e idrici all'interno del suolo

-rappresentazione degli alberi in 3D in modo da analizzare, tramite il modulo TreePass, la loro biomeccanica nonché la resistenza ad eventi metereologici estremi e la manutenzione necessaria. Questo permette di scegliere la specie più adatta ad un determinato luogo/scopo

-determinazione, tramite il modulo di dispersione dell'inquinamento, della dispersione di gas, sia inerti sia reattivi, e delle particelle

-determinazione, tramite BIO-met di indici di comfort termico umano (es. Temperatura fisiologica equivalente (PET), indice di comfort termico universale (UTCI), Predicted Mean Vote (PMV), Percentuale Prevedibile di Insoddisfatti (PPD) che danno un'idea dell'impatto sulla popolazione della temperatura dell'aria, temperatura media radiante, vento e umidità.

-Determinazione, tramite il modello di flusso tridimensionale, dei flussi d'aria e delle turbolenze

Per l'ampia varietà di fattori compresi all'interno del sistema di calcolo alla base del funzionamento del software esso risulta particolarmente adatto allo studio dell'isola di calore urbana, degli effetti della vegetazione in un contesto urbano, della modifica dei flussi d'aria e

di calore a seconda della morfologia urbana, della diffusione degli inquinanti e della qualità dell'aria

Dopo aver scelto i dati di input (configuration file, area input file e database) si può procedere con la progettazione del modello iniziando dalla definizione del dominio che viene creato tramite il programma Spaces ed è suddiviso in 50x50x40 celle tridimensionali ognuna di dimensioni dx, dy, dz nella versione LITE mentre nella versione del software a pagamento si può arrivare ad un numero massimo di celle pari a 250x250x50. In entrambi i casi è opportuno mantenere le celle lungo il bordo del modello libere da edifici perché la loro presenza potrebbe bloccare o incanalare il vento e creare errori di calcolo durante la simulazione. Di solito la distanza tra il bordo del modello e il primo edificio è pari alla metà dell'altezza dell'edificio, di conseguenza, ai confini del modello si hanno circa 4-8 celle vuote.

Prima di eseguire la simulazione con ENVI-core è necessario realizzare degli spazi modello tramite Spaces dal quale si genera un file con estensione .INX che viene utilizzato in ENVI-guide dove viene definito il giorno di inizio simulazione, l'ora di inizio, il tempo totale di simulazione e i dati meteorologici (temperatura, umidità, vento) relativi al giorno in questione. Alla fine il programma ENVI-guide restituisce un file di estensione .SIMX, utilizzato per eseguire la simulazione.

Le simulazioni effettuate con ENVI-met hanno una risoluzione variabile tra 0,5 e 10 metri e vengono eseguite in un periodo di tempo compreso tra le 24 e le 48 ore con un passo temporale di massimo 10 secondi. Questa risoluzione consente di concentrare l'attenzione sulle interazioni a piccola scala tra edifici, superfici e vegetazione infatti solitamente tale software è utilizzato per simulare aree urbane di piccole dimensioni (es. quartiere, isolato etc.)

Infine, i risultati delle simulazioni vengono analizzati con il programma Leonardo che crea mappe cromatiche bidimensionali e tridimensionali, mentre gli indici di comfort urbano (PET, UTCI, PMV, PPD) vengono calcolati tramite il programma BIO-met.

3.2 Struttura del Software

ENVI-met si articola in quattro fasi consecutive: una prima fase relativa alla scelta dei dati di input, una seconda fase relativa alla simulazione vera e propria, una terza fase riguardante la generazione degli output seguita da una quarta e ultima fase concernente la lettura di tali output.

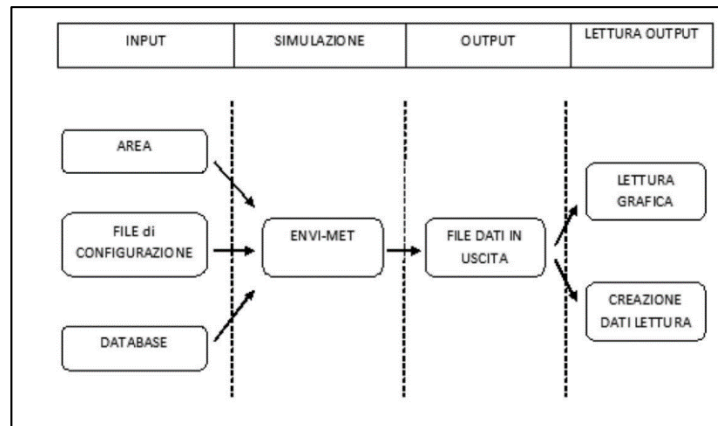


Figura 3.1 Schema della struttura del software ENVI-met (“ENVI-MET principi fisici della modellazione del comfort outdoor” Kristina Fabbri 2015)

Come prima cosa in ENVI-met bisogna, tramite la macro-sezione “Data and Settings” definire il Workspaces inteso come la cartella all’interno della quale vengono raccolti tutti i file utili alla simulazione e creare il Project ossia un’altra cartella all’interno della cartella principale nella quale vengono raccolti tutti gli output.



Figura 3.2 Sezione ENVI-met Data and Setting

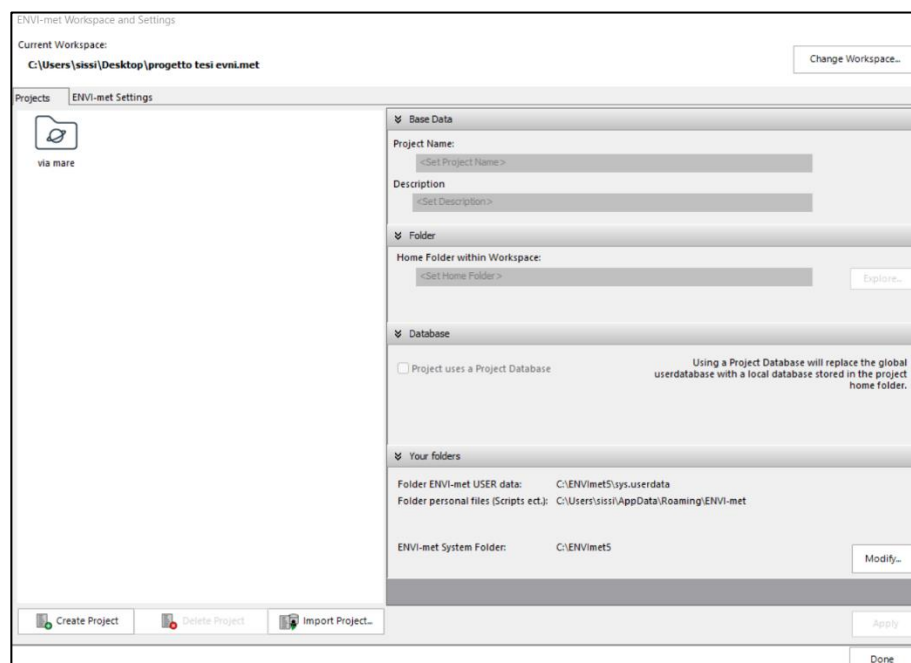


Figura 3.3 Sezione ENVI-met Projects/Workspaces Organize

3.2.1 Input

Nella prima fase si vanno a definire gli input che si suddividono in tre categorie: “File Area Input”, “File di configurazione”, “Database” i quali vengono importati nell’interfaccia (ENVI-core) che, utilizzando opportuni modelli di calcolo, svolge la simulazione vera e propria.

Nel “file Area Input” sono raggruppati tutti i dati geometrici del modello simulato:

- dimensione dell’area
- posizione, altezza sporgenze e rientranze degli edifici
- posizione strade
- posizione e tipologia di vegetazione (a terra e in quota)
- distribuzione dei materiali utilizzati per le superfici urbane
- presenza di specchi d’acqua
- posizione di ricettori
- posizione di sorgenti

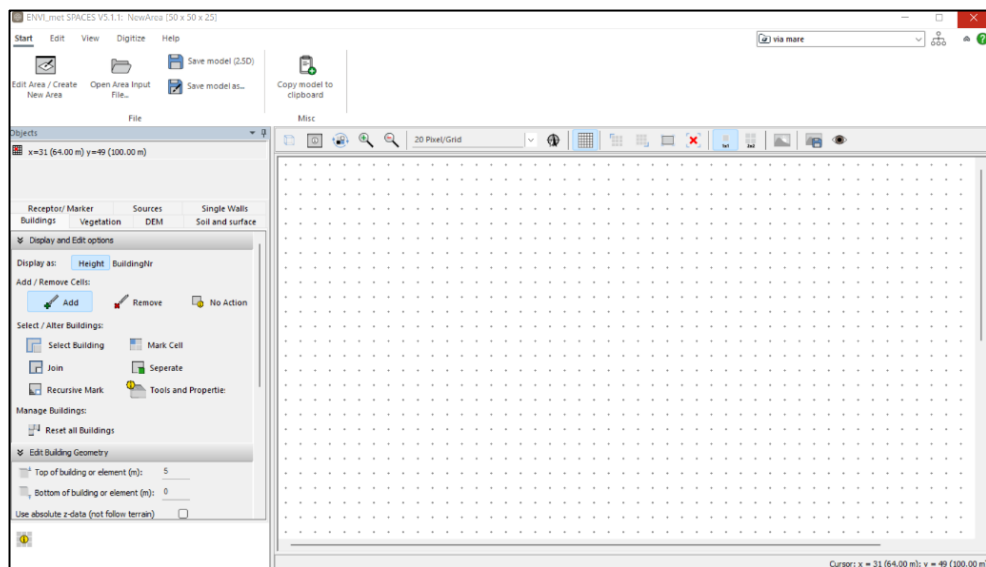


Figura 3.4 Interfacce Spaces, ENVI-met

Per ottenere il file “Area Input” è necessario innanzitutto definire un dominio all’interno di “Spaces” tramite l’icona “Create New Area” che permette di:

- individuare la località in cui ricade l’area del modello ricercandola tramite Google o inserendo le opportune coordinate (latitudine, longitudine).

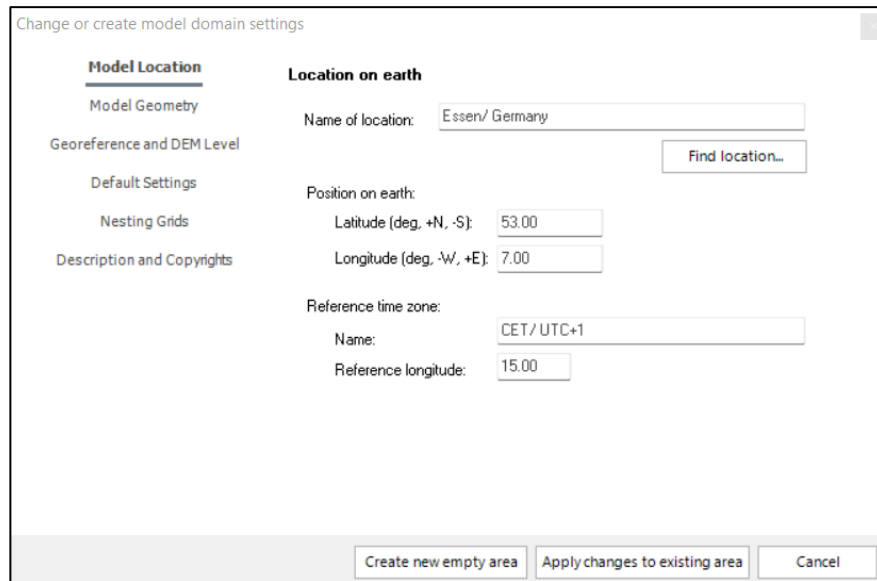


Figura 3.5 Change or create model domain settings-Model Location, ENVI-met

-definire il numero di celle per la direzione x, y e z che nella versione LITE di ENVI-met possono essere al massimo rispettivamente: 50x50x40 oltre che la dimensione di ciascuna cella dx,dy,dz che generalmente è pari a 2 metri e che serve a scalare il modello originario: minore è la dimensione delle celle maggiore è la risoluzione del modello. Maggiore è il numero delle celle maggiore è l'accuratezza della simulazione ma anche del tempo necessario a svolgere i calcoli.

È importante anche definire la rotazione qualora, come nel caso studio in esame, l'area da modellare è inclinata rispetto al Nord perché si preferisce lavorare con un'area che è disposta longitudinalmente alla griglia. Nel caso di Via del Mare è stata imposta una rotazione rispetto al Nord di -12°

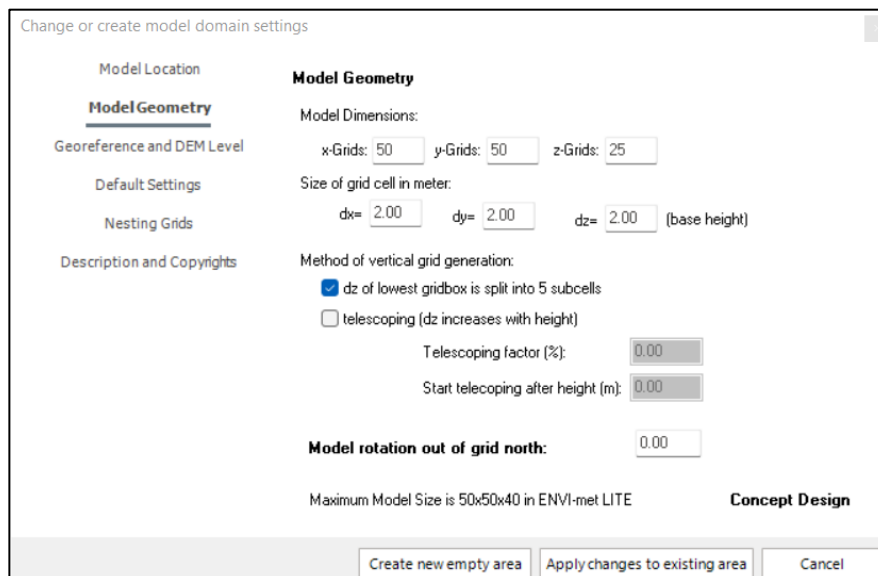


Figura 3.6 Change or create model domain settings-Model Geometry, ENVI-met

Il file Area Input contiene quindi i dati geometrici e qualitativi del modello:

- dimensione area (intesa come numero di celle costituenti)
- geometria degli edifici (altezza, sporgenze e rientranze)
- spazi verdi (a terra e in quota)
- tipo di vegetazione
- strade
- tipologia di suolo
- presenza di specchi d'acqua

Per facilitare la realizzazione dell'area del modello è possibile importare nella griglia, tramite "Digitize", un'immagine Bitmap dell'area di studio da utilizzare come sfondo per il ricalco partendo dal DEM (Digital Elevation Model ossia l'elevazione del suolo): nel caso in esame l'area si trova vicino al mare quindi il valore adeguato di elevazione del terreno è pari a 2 metri che deve essere assegnato ad ogni cella.

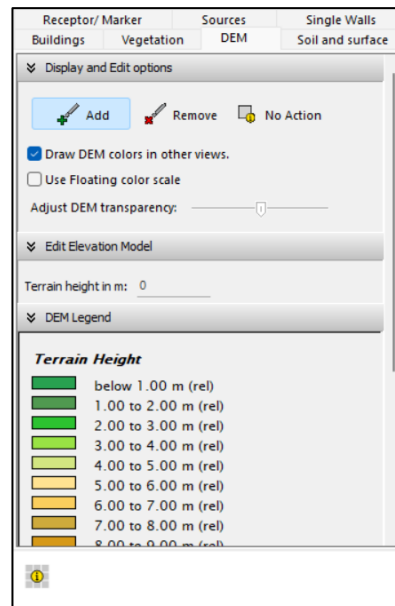


Figura 3.7 Display and Edit DEM options, Spaces, ENVI-met

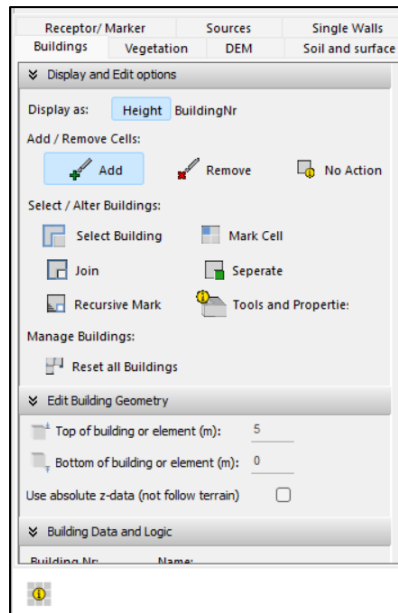


Figura 3.8 Display and Edit Building options, Spaces, ENVI-met

Successivamente si passa ad inserire gli edifici tramite il comando “Buildings” che permette di modificare le specifiche di ogni edificio: materiale delle pareti, tipologia di copertura, eventuali tetti verdi e facciate verdi oltre che le quote degli edifici che nel caso studio in esame sono state estrapolate dal sito della regione Marche.

Per la vegetazione si procede allo stesso modo scegliendo all’interno di “Vegetation” o “Simple plants” per inserire il prato o “3D plants” per inserire alberi, arbusti etc.

L’ultimo step è quello relativo all’aggiunta di suolo e superfici (terreno, pavimenti, acqua) scegliendo le possibili tipologie all’interno di una libreria di default o creandone di proprie.

Potrebbero essere aggiunte anche sorgenti e recettori che però nel caso in esame non sono stati considerati.

Nel “File di configurazione” sono presenti i parametri iniziali di calcolo e le condizioni al contorno dell’area in esame. I parametri minimi necessari all’avvio della simulazione si dividono in general setting e meteorology che possono essere definiti all’interno della sezione ENVI-guide:

Nel primo gruppo (general setting) ricadono:

- Start Date (YYYY MM DD) data del giorno in cui si vuole fare iniziare la simulazione
- Start Time (HH:MM): orario di inizio della simulazione: solitamente si scelgono le 6:00 perché ENVI-met ha bisogno di un iniziale periodo di inizializzazione
- Total Simulation Time (h): periodo di tempo che si vuole simulare: nel nostro caso sono state scelte 18 ore perché è una durata significativa ma permette alla simulazione di impiegare meno tempo
- Full name of simulation task: nome con cui identificare la simulazione

- Short name for file names: prefisso degli output della simulazione
- Folder for model outputs: cartella all'interno della quale vengono salvati gli output
- Load model area file: file da dare in input ad Envi-guide ossia quello ottenuto dalla modellizzazione dell'area effettuata in Spaces (.INX)

Infine, all'interno dei general setting, è necessario scegliere "single core" all'interno dell'opzione "number of CPU cores to be used" perché nella versione LITE di ENVI-met non è supportato il calcolo in parallelo.

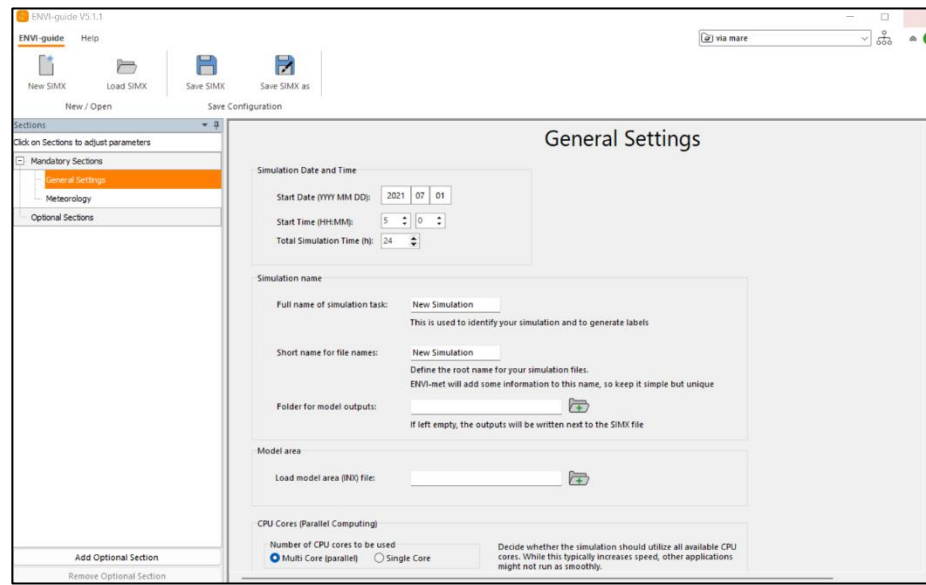


Figura 3.9 Interfaccia ENVI-guide-General Settings, ENVI-met

Nel secondo gruppo (meteorology) all'interno della meteorologia di tipo "simple forcing" i parametri minimi da considerare sono:

- constant windspeed at inflow border (m/s): Velocità del vento. Nel caso in esame è stato lasciato il valore di default di 2m/s

- constant wind direction at inflow (°): una direzione del vento di 0° è indicativa di un vento proveniente da Nord mentre una di 90° rappresenta un vento proveniente da Est. Nel caso in esame è stato lasciato il valore di default di 90°.

- roughness lenght: definisce la scabrezza della superficie. Anche in questo caso è stato lasciato il valore di default 0,010 m

- Air Temperature (K): temperatura potenziale espressa in Kelvin ovvero la temperatura che una particella di fluido alla pressione p avrebbe se fosse portata, tramite uno spostamento adiabatico, ad

una pressione standard di riferimento p_0 , in genere pari ad 1 bar. Vengono inseriti manualmente i valori per ogni ora della giornata da simulare ricavati, nel caso in esame, dal sito della Protezione Civile della regione Marche facendo riferimento alla centralina di San Benedetto del Tronto.

- Specific Humidity in 2500 m (g/kg): valore di umidità specifica misurata alla sommità del modello.

-Relative Humidity (%): umidità relativa espressa in percentuale. Vengono inseriti manualmente i valori per ogni ora della giornata da simulare ricavati, nel caso in esame, dal sito della Protezione Civile della regione Marche facendo riferimento alla centralina di San Benedetto del Tronto

-Low clouds, medium clouds, High clouds: copertura nuvolosa espressa in ottavi

Sempre in meteorology vengono inoltre indicate le ore in cui sono state registrate la massima e la minima temperatura dell'aria e dell'umidità relativa.

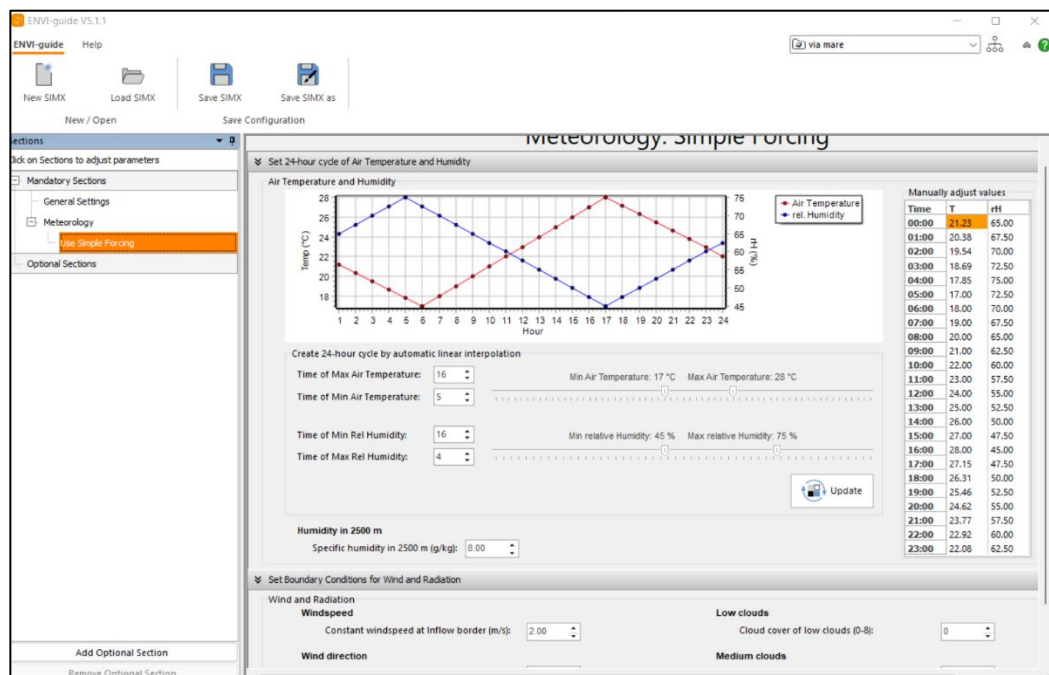


Figura 3.10 Interfaccia ENVI-guide-Meteorology, ENVI-met

I “Database” associati ad ogni modello di simulazione, contengono dati e parametri utili per le equazioni sui quali si basano i calcoli svolti dal software e si dividono in:

-database per la vegetazione (contenente dati relativi alla tipologia di piante, alle caratteristiche fisiologiche delle foglie e delle radici, densità di area fogliare etc.)

-database per stratigrafia del suolo (dati relativi alla tipologia di terreno in particolare contenuto d’acqua e conducibilità termica)

-database per ogni differente strato contenuto nel suolo

3.2.2 ENVI-core

ENVI-core è l'interfaccia che si occupa della simulazione vera e propria quindi rappresenta il motore del sistema che permette lo svolgimento dei calcoli per la risoluzione di equazioni molto complesse solitamente non lineari quali le Equazioni di Navier-Stokes e le Equazioni di Boussinesq risolvibili tramite modelli matematici che permettono di generare parametri fluidodinamici quali il flusso d'aria e la turbolenza e simulare processi termodinamici che interessano superfici edifici e vegetazione, i flussi radiativi e le modifiche climatiche nel tempo.

In questa sezione viene aperto il file .SINX ottenuto tramite ENVI-guide, lo si sottopone ad un controllo ("Check") per scongiurare la presenza di errori e in caso positivo si procede con la simulazione ("Run") il cui avanzamento può essere controllato in maniera istantanea tramite una barra di avanzamento.

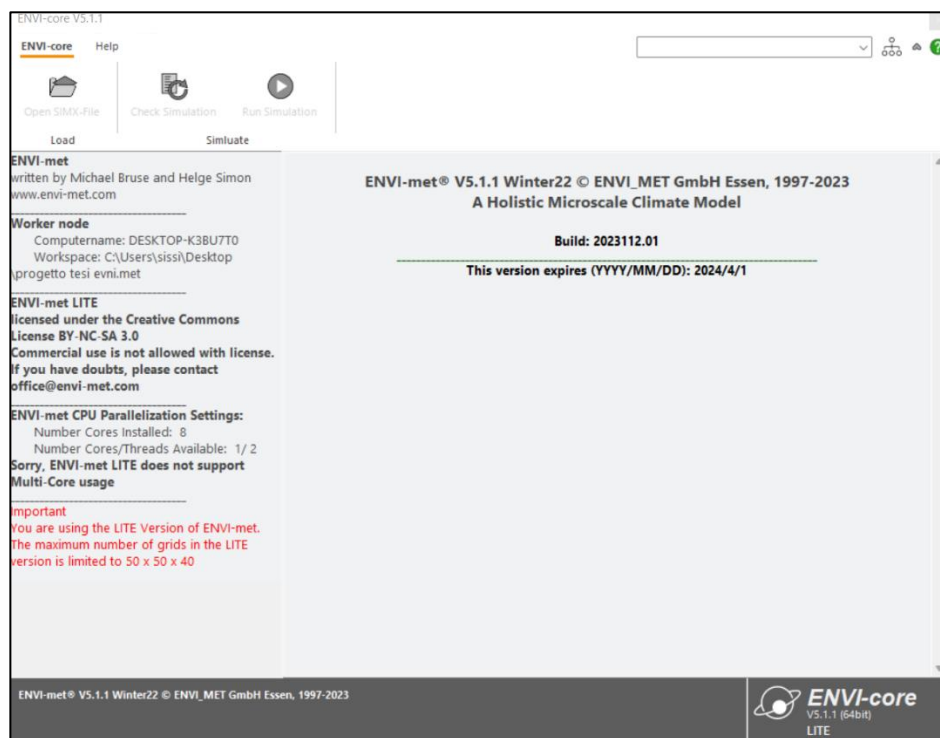


Figura 3.11 Interfaccia ENVI-core, ENVI-met

3.2.3 Output

Al termine della simulazione si ottengono una enorme varietà di output organizzati in sette sottocartelle contenute all'interno della cartella del progetto: Atmosphere, Buldings, Inflow, Log, Radiation, Receptors, Soil, Surface e Vegetation.

Nel caso studio in esame l'attenzione è ricaduta principalmente sugli output della cartella atmosphere che contiene, per ogni ora di simulazione, due file:

-un file di testo (.EDX) che può essere letto solo tramite le due interfacce di lettura di cui è dotato ENVI-met: Leonardo, Xtract

-un file (.EDT) collegato al precedente ma che non viene mai aperto e analizzato

Entrambi sono file orari che per ogni z di ogni cella forniscono i valori di: vento, umidità relativa e specifica, temperatura media radiante, temperatura potenziale dell'aria oppure di altri dati connessi all'inquinamento: flusso di vapore, flusso di anidride carbonica o di altri inquinanti o ancora riguardanti la vegetazione o la turbolenza: coefficiente di scambio e dissipazione cinetica o relativi alla radiazione: flusso di radiazione incidente, Sky View Factor, flussi radiativi di scambio a bassa frequenza o al benessere termoigrometrico: PMV etc.

Leonardo è un'interfaccia di lettura e rappresentazione grafica che permette di ottenere delle mappe cromatiche 2D o 3D

Dopo aver importato il file atmosphere (.EDX) ottenuto dalla simulazione effettuata con ENVI-core si procede con l'estrazione in mappa dei dati contenuti in tale file: si sceglie il dato da visualizzare, il tipo di sezione che si vuole effettuare (X-Y, X-Z, Y-Z) e l'altezza dal suolo alla quale si vuole sezionare (solitamente si sceglie l'altezza media dell'individuo $k=3$ corrispondente a circa 1,40 m da suolo) facendo attenzione a scegliere in "handle topography" l'opzione "follow terrain".

Tramite Leonardo i dati possono essere visualizzati tramite quattro metodi grafici differenti: data, vector, isoline, special.

Nel caso di studio condotto per la presente tesi si è scelto di visualizzare la temperatura potenziale dell'aria con la modalità "data" cioè tramite mappe cromatiche i cui colori sono spiegati tramite le relative legende.

-Xtract è un'interfaccia che permette di convertire i file bidimensionali e tridimensionali ottenuti dalla simulazione in file di testo leggibili e analizzabili da importare in appositi programmi di calcolo per poter analizzare i dati in essi contenuti.

Xtract, a differenza di Leonardo, consente di analizzare la variazione giornaliera di un parametro andando ad estrarre numerosi file (ognuno relativo ad un parametro orario) ed importandoli in un unico foglio di calcolo.

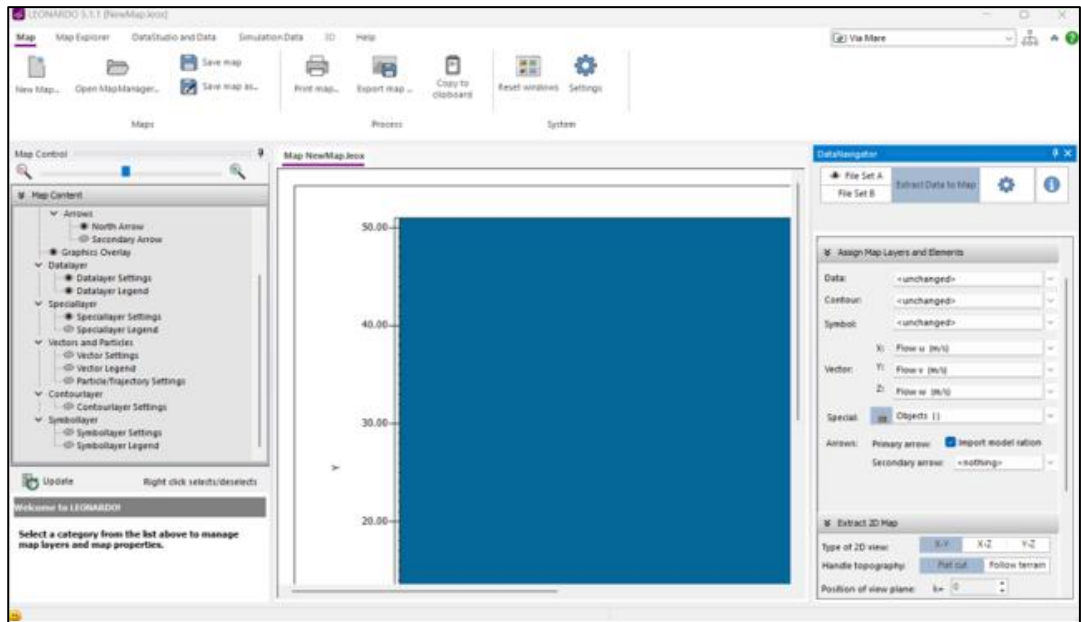


Figura 3.12 Interfaccia Leonardo. ENVI-met

3.2.4 BIO-met

BioMet è uno strumento di post-elaborazione per il calcolo degli indici di comfort termico umano (es. PET, UTCI, PMV, PPD, TMR) ottenibili sulla base dei dati contenuti nei file di output della simulazione. In particolare, BIO-met ha bisogno dei file output atmosferici in quanto definisce l'impatto delle quattro variabili atmosferiche sul benessere termico dell'uomo: aria, temperatura, temperatura radiativa, velocità del vento e umidità

La qualità e l'affidabilità dei risultati di BioMet dipende completamente dalla qualità e affidabilità dei dati forniti nei file di output.

In particolare, nel caso studio in esame l'indicatore utilizzato per l'analisi della simulazione è il PMV di cui si è ampiamente parlato nel capitolo 1.5 relativo alle conseguenze dell'isola di calore urbana.

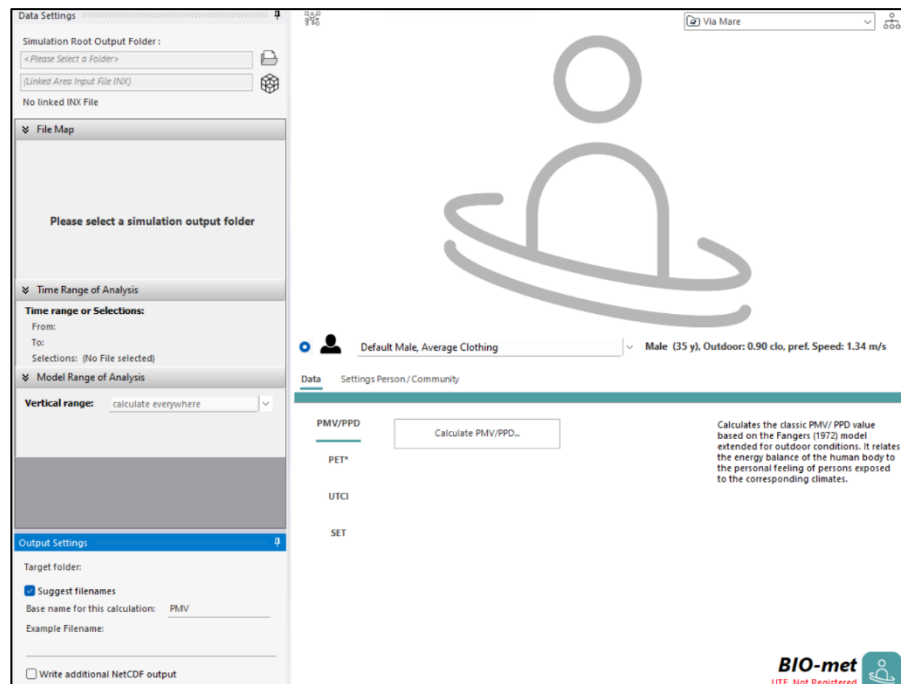


Figura 3.13 Interfaccia BIO-met, ENVI-met

3.3 Limiti di ENVI-met

I limiti del software Envi-met sono legati alle semplificazioni necessarie a vincere la complessità del modello di calcolo su cui si basa il sistema a causa dell'influenza reciproca dei fattori ambientali:

- semplificazioni legate alla creazione del file di Area all'interno del quale un qualsiasi elemento (edifici, piante etc.) viene rappresentato come una sovrapposizione di celle; questo non crea problemi per gli elementi più grandi mentre quelli più piccoli delle dimensioni delle celle potrebbero risultare con un volume sovrastimato che potrebbe interferire con vento e incidenza della radiazione al suolo e quindi comportare degli errori nel calcolo dei flussi di aria e dei flussi radiativi.

- tutti gli edifici presenti nel file Area devono avere stesso albedo e stessa trasmittanza. Questo è un altro motivo, insieme alla necessità di ridurre i tempi di risoluzione, per il quale le zone da simulare sono di piccole dimensioni in modo da essere il più possibile omogenee.

Gli edifici devono inoltre essere tutti opachi ossia privi di superfici vetrate questo comporta l'impossibilità di considerare effetti quali riflessione, variazione di trasmittanza e irraggiamento all'interno degli edifici con possibilità di incidere sulle condizioni esterne all'edificio.

- la temperatura interna degli edifici viene considerata costante. Questa però è una semplificazione che non si sposa bene con l'impossibilità di ENVI-met di simulare sorgenti di calore di tipo antropogenico come i sistemi di condizionamento che sono invece necessari a mantenere invariata la temperatura degli ambienti interni.

-la capacità termica degli edifici viene trascurata. Essendo un parametro fondamentale nello sviluppo dell'isola di calore urbano, non tenerlo in considerazione potrebbe portare a risultati poco attendibili.

-nel file Area è impossibile modificare la quota del suolo questo comporta che si possono simulare zone omogenee da un punto di vista altimetrico, senza grandi dislivelli. Inoltre, in tali aree non è possibile considerare i dislivelli di strade, edifici, rampe etc. che potrebbero incidere notevolmente su flussi di aria e zone d'ombra che invece non vengono considerati nella simulazione.

-impossibile riprodurre specchi d'acqua, fontane o il movimento dell'acqua. Quindi i valori di temperatura ricavati potrebbero non essere perfettamente esatti perché la presenza di corpi idrici può abbassare la temperatura dell'aria.

-i recettori possono essere posti solo al livello del suolo perché se posti su un edificio risultano coperti da esso.

-nell'ultima fase di lettura degli output si può procedere con un solo file orario alla volta e concentrando l'attenzione su un solo parametro.

Per i motivi sopra elencati ENVI-met viene principalmente usato per verificare l'effetto della vegetazione sul microclima, per confrontare una stessa area con condizioni di verde diverse, per ricavare i valori degli indici di comfort a seguito di una ristrutturazione urbana, per studiare le possibili tecniche di mitigazione da attuare allo scopo di mitigare il fenomeno dell'isola di calore urbana.

Capitolo 4

SIMULAZIONI SVOLTE IN ENVI-met PER VIA DEL MARE PORTO D'ASCOLI (SAN BENEDETTO DEL TRONTO)

4.1 Metodo e finalità delle simulazioni

Nel presente lavoro di tesi, per analizzare l'effetto mitigativo della vegetazione sull'isola di calore urbana, è stata posta l'attenzione in un tratto di Via del Mare a Porto d'Ascoli, una frazione di San Benedetto del Tronto in provincia di Ascoli Piceno, attualmente sottoposta a una riqualificazione, indetta dal Comune di San Benedetto del Tronto, consistente in una sostituzione dei pini (*Pinus Pinea*) preesistenti con delle palme (*Palm, small trunk, dense, small (5m)*) e del calcestruzzo grigio del marciapiede con del calcestruzzo chiaro.

Essendo la vegetazione un elemento vivo e in continua evoluzione le simulazioni sono state eseguite in diversi momenti temporali: in particolare nei giorni 4 Luglio 2022 e 17 Dicembre 2022 considerati rappresentativi rispettivamente del periodo estivo e del periodo invernale.

Sono state considerate due giornate con condizioni climatiche diverse in modo da mettere in evidenza quanto i parametri metereologici (temperatura, umidità relativa, velocità del vento, copertura nuvolosa) possano incidere nella modifica della temperatura a seguito di una modifica ambientale.

Per entrambi i giorni è stata svolta, tramite il software ENVI-met, una simulazione dell'area allo stato attuale (pini e calcestruzzo grigio) in modo da poter quantificare il cambiamento delle condizioni climatiche a seguito dell'abbattimento dei pini e dell'introduzione del calcestruzzo chiaro per il ricoprimento del marciapiede (2° simulazione) e successivamente della piantumazione di palme (3° simulazione).

Via del Mare ha una lunghezza complessiva di circa 1 Km, si estende ortogonalmente alla costa da Via dei Milla fino alla Ss16/Strada Statale Adriatica tagliando, nel suo breve tragitto, perpendicolarmente la stazione ferroviaria di Porto d'Ascoli.

Invece il tratto sottoposto ad analisi ha una lunghezza di circa 90 m collocato in prossimità di Via del Cacciatore all'estremo ovest della porzione di Via Mare sottoposta a riqualificazione.

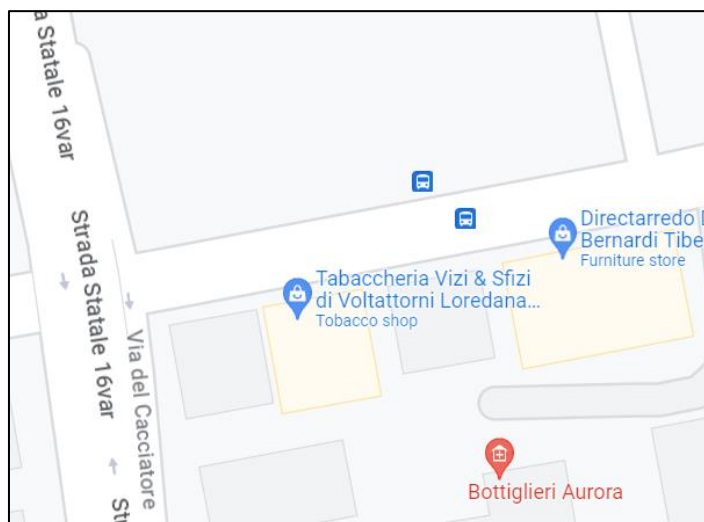


Figura 4.1 Dominio dell'area di studio (Google Maps, Street View)



Figura 4.2 Immagine .bmp dominio dell'area di studio

Per valutare i risultati sono stati usati come indicatori di benessere termoigrometrico la temperatura potenziale dell'aria valutata sia per il periodo estivo che per il periodo invernale e i due indici di comfort: PMV e PPD valutati solo per il periodo estivo. Tutti i parametri sono stati ricavati alla quota di 1.4 m dal suolo, alle ore 14.00.01.

Il giorno 4 Luglio e 17 Dicembre sono considerati i due giorni rappresentativi (giorni tipici) del periodo estivo e del periodo invernale ottenuti a partire dai dati di temperatura misurati dalla centralina di San Benedetto del Tronto e trovati dal Sito della Protezione Civile della Regione Marche (SIRMIP). Essendo il giorno tipico il giorno definito dal 95esimo percentile, è stato calcolato applicando la funzione ESC.PERCENTILE presente in excel ai dati orari di temperatura dei mesi estivi (Giugno-Luglio-Agosto-Settembre) per ricavare il giorno tipico estivo (in tal caso nella funzione percentile è stato inserito il valore 0.95) e dei mesi invernali (Ottobre-Novembre-Dicembre-Gennaio-Febrero Marzo) (in tal caso nella funzione percentile è stato inserito il valore 0.5) per ricavare il giorno tipico invernale. Nel primo caso si trova il

valore della temperatura che è stato superato solo nel 5 % dei casi e il giorno associato a quel valore di temperatura viene considerato il giorno rappresentativo del periodo estivo mentre nel secondo caso si trova il valore della temperatura che è stato superato nel 95% dei casi e il giorno corrispondente è il giorno rappresentativo del periodo invernale.

Dopodiché una volta stabilito, tramite l'analisi statistica appena enunciata, il giorno in cui effettuare la simulazione sono stati ricavati per tale giorno, sempre attraverso il sito della protezione civile della regione marche, i valori orari di temperatura e umidità relativa da aggiungere manualmente in ENVI-guide alla sezione meteorology.

Prima di addentrarci nella discussione e nell'analisi dei risultati ottenuti dalle simulazioni nei due diversi giorni tipici risulta opportuno, per una migliore comprensione degli output, riportare le informazioni tecniche dei materiali utilizzati per suolo e superfici, per le pareti e le coperture degli edifici oltre che per il prato individuabili all'interno di DB Manager nella sezione Data and Settings. Nella medesima sezione alla voce "Albero" è possibile ricavare le proprietà delle piante inserite all'interno dell'area (albedo, emissività, trasmittanza, tipo di foglie, diametro delle radici, densità del legno etc.).

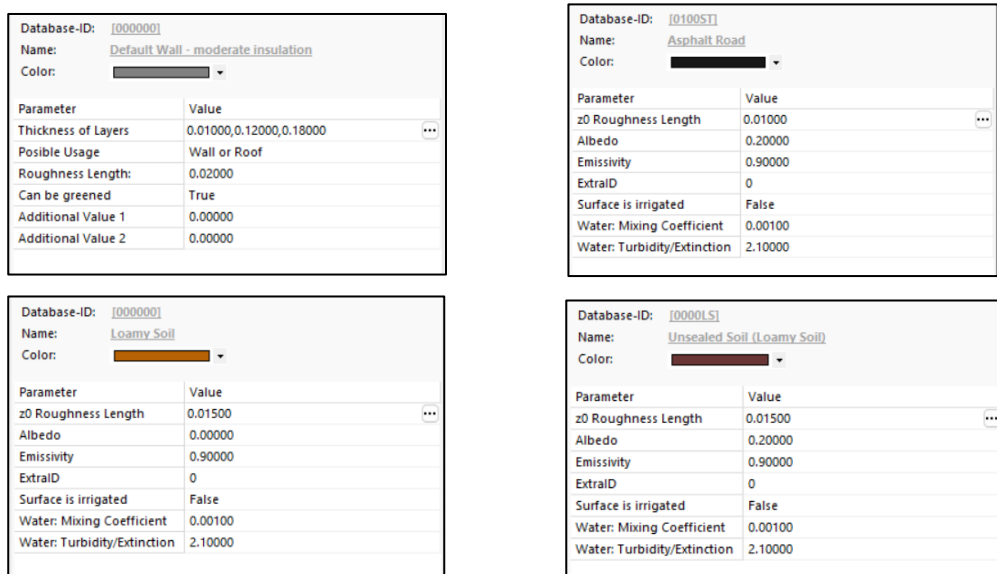


Figura 4.3 Proprietà tecniche dei materiali utilizzati per il suolo e le superfici presenti in DB Manager, ENVI-met

Il materiale utilizzato per le pareti e le coperture degli edifici (Default Wall) rimane invariato in tutte e tre le simulazioni, come anche l'asfalto utilizzato per la strada (Asphalt Road) e il materiale del terreno nudo (Loamy Soil per il suolo tra le abitazioni presenti lungo Via del Mare e Usealed Soil per quello dello spiazzale ineditato adiacente la via).

Invece per quanto riguarda il materiale utilizzato per il marciapiede nella prima simulazione viene utilizzato il calcestruzzo grigio (Concrete Pavement Gray) mentre nella seconda e terza simulazione il calcestruzzo chiaro (Concrete Pavement Light).

Come riportato nelle loro schede tecniche tutti i parametri sono identici per entrambi i materiali eccetto per l'albedo che è notevolmente superiore per il calcestruzzo chiaro (0.80000) rispetto a quello grigio (0.50000). Questo comporta che il primo garantisce un maggiore riflettanza della radiazione solare incidente e di conseguenza una minore temperatura.

Database-ID: [0100PG]	
Name:	Concrete Pavement Gray
Color:	<input type="text"/>
Parameter	Value
z0 Roughness Length	0.01000
Albedo	0.50000
Emissivity	0.90000
ExtralID	0
Surface is irrigated	False
Water: Mixing Coefficient	0.00100
Water: Turbidity/Extinction	2.10000

Database-ID: [0100PL]	
Name:	Concrete Pavement Light
Color:	<input type="text"/>
Parameter	Value
z0 Roughness Length	0.01000
Albedo	0.80000
Emissivity	0.90000
ExtralID	0
Surface is irrigated	False
Water: Mixing Coefficient	0.00100
Water: Turbidity/Extinction	2.10000

Figura 4.4 Proprietà tecniche dei due calcestruzzi utilizzati per il marciapiede presenti in DB Manager, ENVI-met

Come già accennato precedentemente il tipo di pianta presente nella 1° simulazione (stato di fatto) è il pino (Pinus Pinea) mentre quello presente nella 3° simulazione (stato post riqualificazione) è la palma (Palm, Small truk, dense, small (5m)).

Confrontando le schede tecniche delle due specie arboree è facile notare che la principale differenza tra le due è il valore dell'albedo: maggiore nella prima (0.60) rispetto che nella seconda (0.18); il tipo di foglie: conifere nel pino, decidue nella palma e il diametro delle radici: 10m per il pino, 3m per la palma.

Il maggior albedo del pino comporta una maggiore riflettanza da parte delle foglie, inoltre nonostante le foglie hanno una forma ad aghi che potrebbe portare a pensare ad una minore evapotraspirazione rispetto a quella che si avrebbe in presenza di foglie con una maggiore LAI come quelle delle palme, i pini hanno una superficie di scambio gassoso maggiore quindi l'efficacia di evapotraspirazione dei pini è complessivamente maggiore rispetto a quella della palma. In aggiunta la chioma dei pini è costituita da un insieme di aghi disposti molto vicini gli uni agli altri comportando una densità della stessa maggiore rispetto alla chioma delle palme questo garantisce ai pini una maggiore capacità di filtrare le radiazioni solari rispetto alle palme. Infine, l'apparato radicale dei pini ha un diametro molto più elevato rispetto a quello delle palme e dato che, lo sviluppo delle radici è strettamente connesso allo sviluppo della chioma, questo implica anche un'ampiezza della chioma dei pini maggiore e quindi un ombreggiamento maggiore prodotto dal pino rispetto a quello della palma.

La diversa efficienza dei due processi (evapotraspirazione e ombreggiamento) delle due tipologie di piante permette di concludere che l'effetto mitigativo del pino è complessivamente maggiore rispetto a quello della palma.

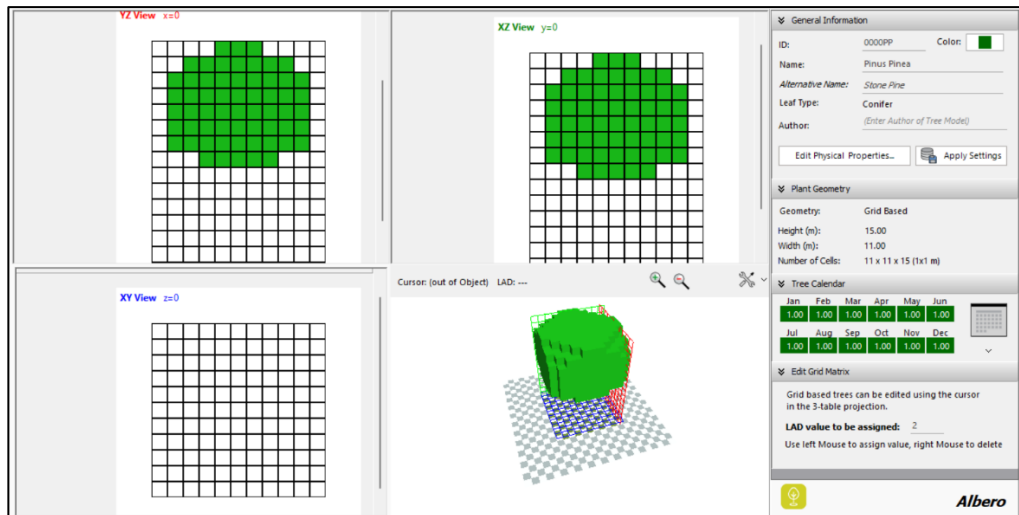


Figura 4.5 Proprietà Pinus Pinea presenti in Albero, ENVI-met

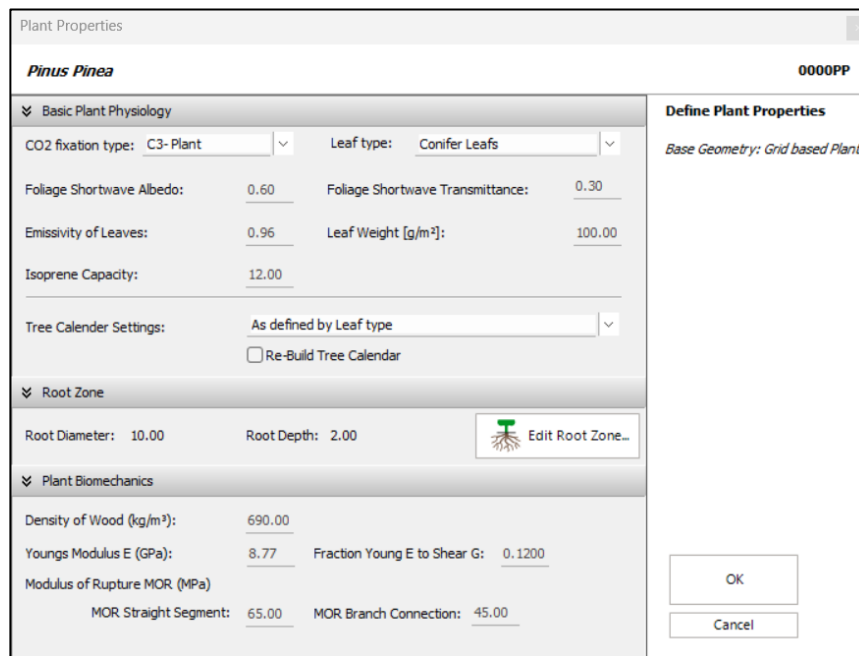


Figura 4.6 Proprietà Pinus Pinea presenti in Albero, ENVI-met

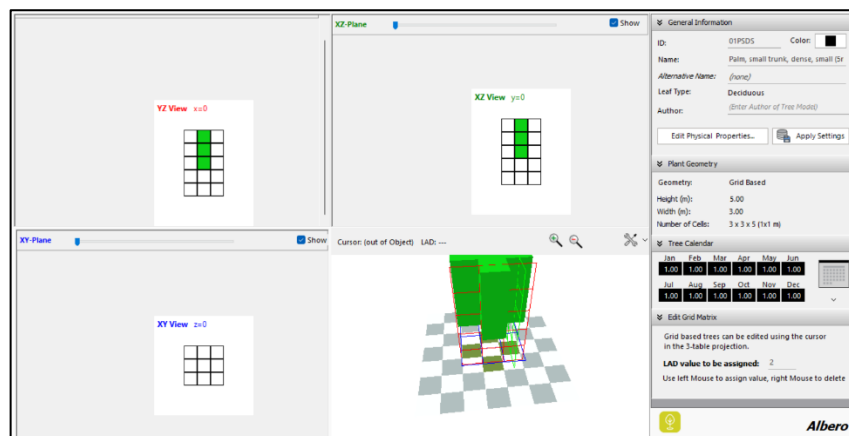


Figura 4.7 Proprietà Palm, small trunk, dense, small (5m) presenti in Albero, ENVI-met

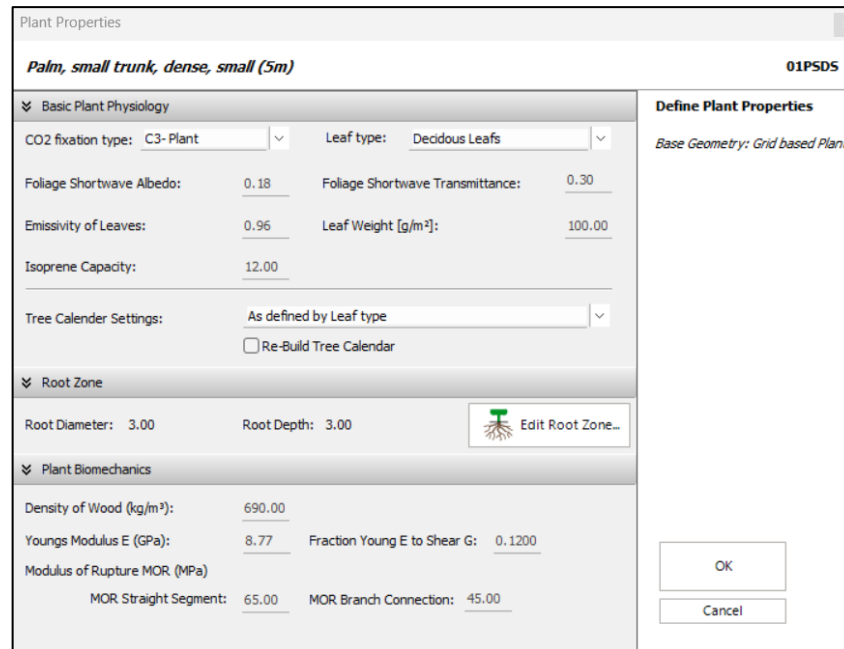


Figura 4.8 Proprietà Palm, small trunk, dense, small (5m) presenti in Albero, ENVI-met

Le considerazioni fatte sulla base delle proprietà dei materiali usati per il marciapiede e delle specie arboree piantumate lungo Via del Mare trovano conferma nella lettura, sottoforma di mappe cromatiche generate con Leonardo, degli output ottenuti dalle simulazioni.

4.2 Simulazioni estive

Come già detto, per il giorno 4 Luglio 2022, considerato il giorno tipico del periodo estivo, sono state effettuate tre simulazioni: la simulazione dello stato di fatto, la simulazione intermedia e la simulazione dello stato finale in modo tale da analizzare come cambia la temperatura, e di conseguenza il comfort outdoor, a seconda di diversi contesti microurbani. Il dato scelto per indicare tale dipendenza del benessere termoisometrico dall'ambiente circostante è la temperatura potenziale dell'aria in quanto essa non risente delle variazioni di quota ma solo dei processi di riscaldamento e raffreddamento oltre che gli indici di comfort termico: PMV e PPD.

4.2.1 Stato di fatto

L'area di input file realizzata in Spaces per lo stato di fatto è caratterizzata da una strada in asfalto (ST), un marciapiede in calcestruzzo grigio (PG) e dal restante suolo in terreno argilloso sigillato (00) eccetto per lo spiazzale inedito a nord-ovest dell'area di studio che è sempre un terreno argilloso ma non sigillato (LS). Per quanto riguarda la vegetazione presente le piante che

costeggiano la via sono pini (PP) mentre nelle zone a sud tra una fila di edifici e l'altra sono presenti sia pini (PP), sia tigli (PR), sia palme (DS)



Figura 4.9 Soil and surface dell'area della simulazione con marciapiede in calccestruzzo chiaro visualizzata in Spaces, ENVI-met

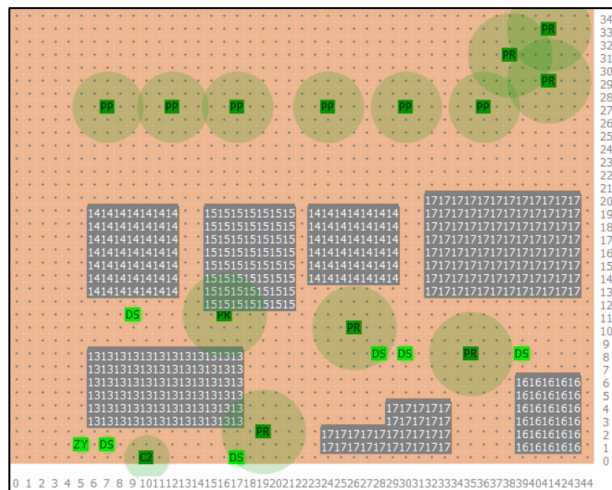


Figura 4.10 Vegetation dell'area della simulazione con pini visualizzata in Spaces, ENVI-met

Dopo aver inserito manualmente in ENVI-guide i dati meteo (temperatura, umidità relativa) per ogni ora del giorno 4 Luglio, specificando l'ora in cui si è registrata la temperatura e l'umidità relativa massima e minima e lasciando per la velocità/direzione del vento e per la copertura nuvolosa i valori di default, si è proceduto con la simulazione in ENVI-core che ha generato diversi output.

Di seguito è riportata la mappa cromatica ottenuta in Leonardo relativa all'output Atmosphere delle ore 14.00.01 del giorno 4 Luglio 2022 nella quale vengono riportati sottoforma di colori, spiegati tramite una legenda, i diversi valori di temperatura potenziale dell'aria raggiunti nelle diverse zone dell'area oltre che il valore massimo e minimo.

La mappa cromatica è ottenuta tramite una sezione nel piano xy alla quota di 1.40m dal terreno. Come orario in cui valutare il valore della temperatura potenziale dell'aria è stato scelto le 14.00.01 in quanto esso, essendo considerato l'orario più caldo della giornata, permette di

valutare, unito alla scelta di un cielo sereno e di una bassa ventosità, l'effetto mitigativo ottenuto tramite le modifiche apportate nell'area di studio nella condizione climatica più critica.

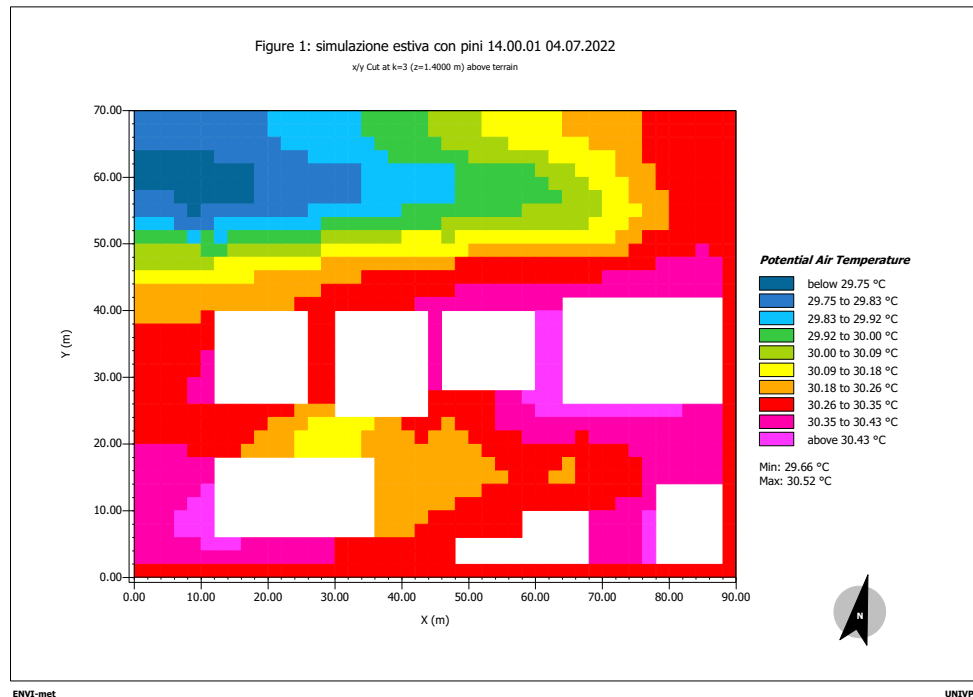


Figura 4.11 Output simulazione estiva stato di fatto visualizzato in Leonardo, ENVI-met-TEMPERATURA POTENZIALE DELL'ARIA

Dalla mappa cromatica risulta evidente che la temperatura aumenta in maniera graduale passando dallo spiazzale ineditato in terreno argilloso (ciano/azzurro 29.75-29.92°C) ai pini (verde scuro/chiaro 29.92-30.09°C) fino ad arrivare alla strada in asfalto (rosso 30.26-30.35°C) e alle zone in prossimità degli edifici (magenta 30.35-30.43°C) in cui giocano un ruolo importante nell'incremento di temperatura non solo i materiali costituenti gli edifici ma anche le riflessioni multiple causate dalla disposizione degli stessi a forma di canyon urbano.

In particolare, la temperatura massima di 30.52°C si registra in prossimità degli edifici a sud-est in quanto fiancheggiati da uno spiazzale adibito ai parcheggi e in prossimità dell'edificio a sud-ovest a causa della vicinanza con la strada provinciale 227 mentre la minima di 29.66°C si registra nello spiazzale in terreno argilloso non sigillato a Nord-Ovest. Quindi la massima differenza di temperatura registrata per l'area di studio allo stato di fatto è di circa 1°C che in estate è un valore assolutamente plausibile.

4.2.2 Stato intermedio

Per la seconda simulazione, relativa allo stato intermedio, in Spaces è stato sostituito il calcestruzzo grigio del marciapiede con il calcestruzzo chiaro (PL) e sono stati rimossi i pini che nello stato di fatto costeggiavano la strada di Via del Mare.

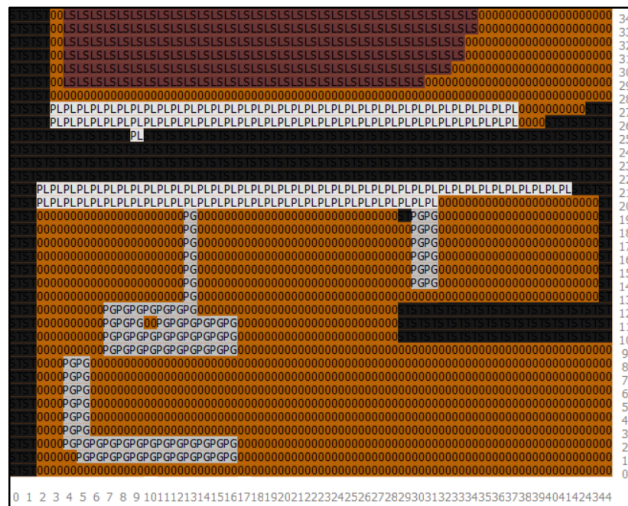


Figura 4.12 Soil and surface dell'area della simulazione con marciapiede in calcestruzzo chiaro visualizzata in Spaces, ENVI-met

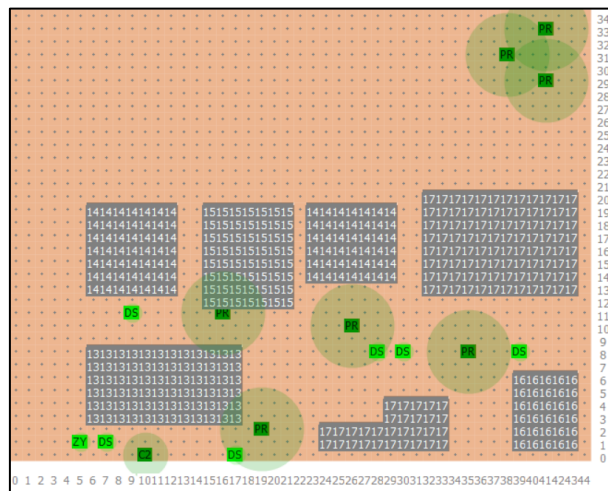


Figura 4.13 Vegetation dell'area della simulazione senza pini visualizzata in Spaces, ENVI-met

La mappa cromatica ottenuta tramite Leonardo, relativa al file output Atmosphere delle ore 14.00.01 è la seguente:

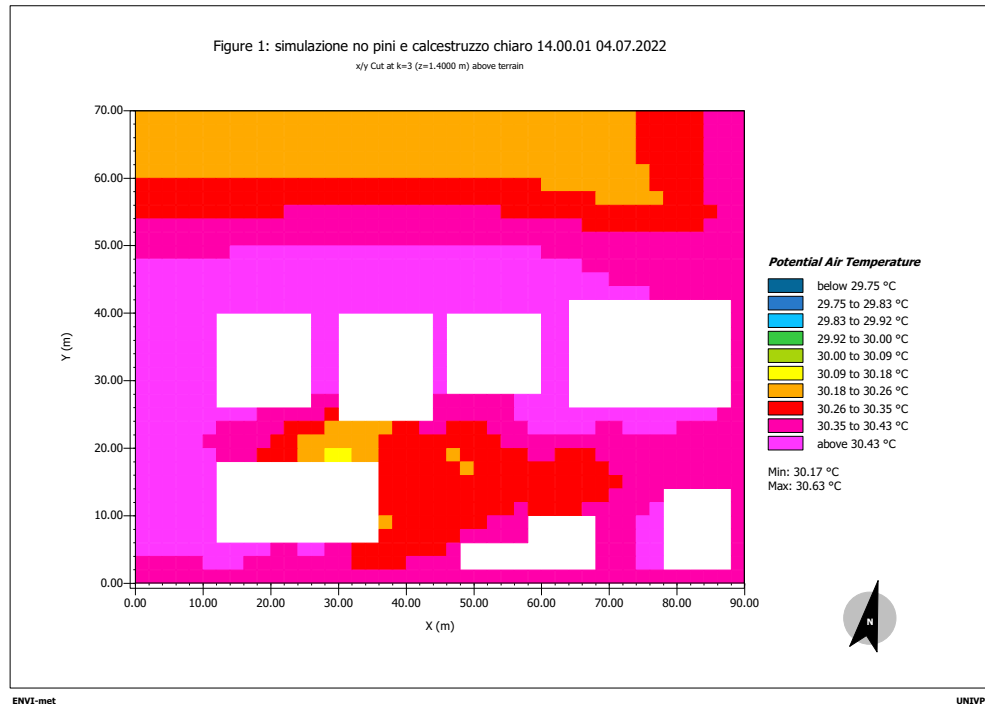


Figura 4.14 Output simulazione estiva stato intermedio visualizzato in Leonardo, ENVI-met-
TEMPERATURA POTENZIALE DELL'ARIA

Dalla mappa cromatica è evidente un netto aumento della temperatura a causa della rimozione dei pini. La loro assenza comporta anche una scomparsa del gradiente di temperatura tipico dello stato di fatto infatti sono completamente assenti i colori ciano, azzurro, verde chiaro, verde scuro e giallo relativi ad una temperatura variabile tra 29.75°C e 30.18°C infatti la temperatura minima registrata nell'area allo stato intermedio è di 30.17°C contro i precedenti 29.66°C. Quindi c'è una differenza di circa 1°C tra la prima e seconda simulazione.

Questo output dimostra che la sostituzione del calcestruzzo grigio con un calcestruzzo a maggior albedo non è sufficiente a garantire un adeguato raffreddamento dell'area per il quale è fondamentale l'azione sinergica di entrambe le tecniche di mitigazione.

Nella zona a Sud dell'area, in particolare nel canyon urbano Ovest-Est il valore della temperatura potenziale dell'aria rimane invariato attestandosi in un range di 30.26-30.43°C ad eccezione di un punto individuato con il colore arancione/giallo in cui le temperature sono inferiori a causa di una concentrazione di tigli.

Questo testimonia che, esattamente come l'effetto mitigativo della vegetazione si estende oltre la zona in cui essa viene effettivamente applicata in virtù della sua estensione e della presenza del vento (che nel caso in esame si considera provenire da Est (90°)), anche la rimozione della vegetazione ha un impatto non solo locale ma si risente a distanze consistenti.

4.2.3 Stato finale

La terza simulazione è quella relativa allo stato finale che si raggiungerebbe una volta terminato l'intervento di riqualifica di Via del Mare per il quale è previsto una sostituzione di pini con palme.

L'area Input utilizzata per la terza simulazione è quindi caratterizzata da marciapiede in calcestruzzo chiaro (PL) e presenza lungo la strada di Via del Mare di palme. Per la modellizzazione dell'Area Input sono state scelte le palme denominate "small trunk, dense, small (5m)" (DS).

Quindi il modello dell'area utilizzato per questa terza simulazione risulta essere uguale a quello dello stato intermedio per quanto riguarda il soil and surface mentre è diverso per quanto riguarda la vegetation:

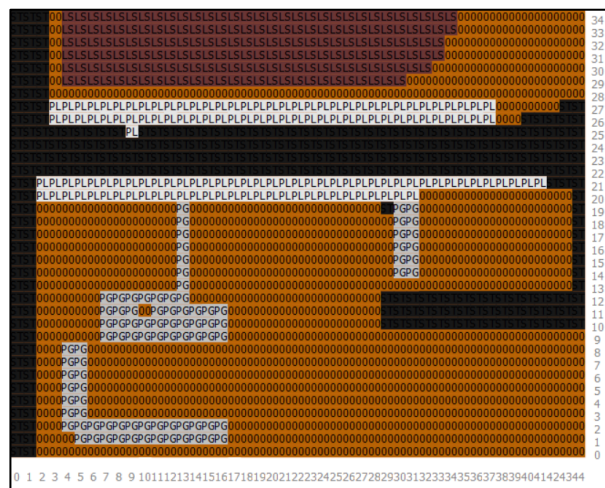


Figura 4.15 Soil and surface dell'area della simulazione con marciapiede in calcestruzzo chiaro visualizzata in Spaces, ENVI-met

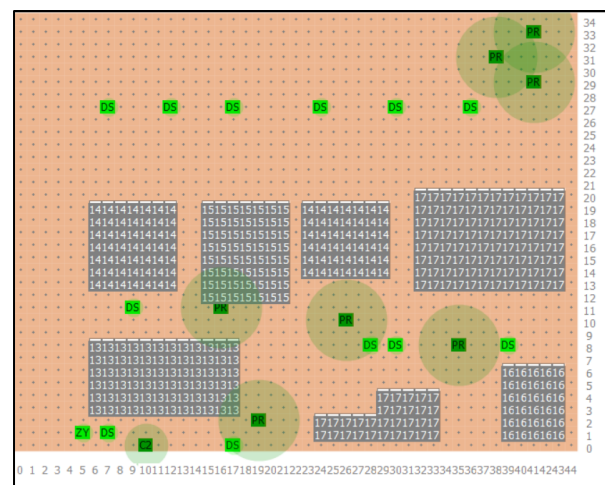


Figura 4.16 Vegetation dell'area della simulazione con palme visualizzata in Spaces, ENVI-met

Di seguito è riportata la mappa cromatica ottenuta tramite Leonardo, relativa al file output Atmosphere sempre delle ore 14.00.01 in modo da poter essere utilizzata per un confronto con le altre due:

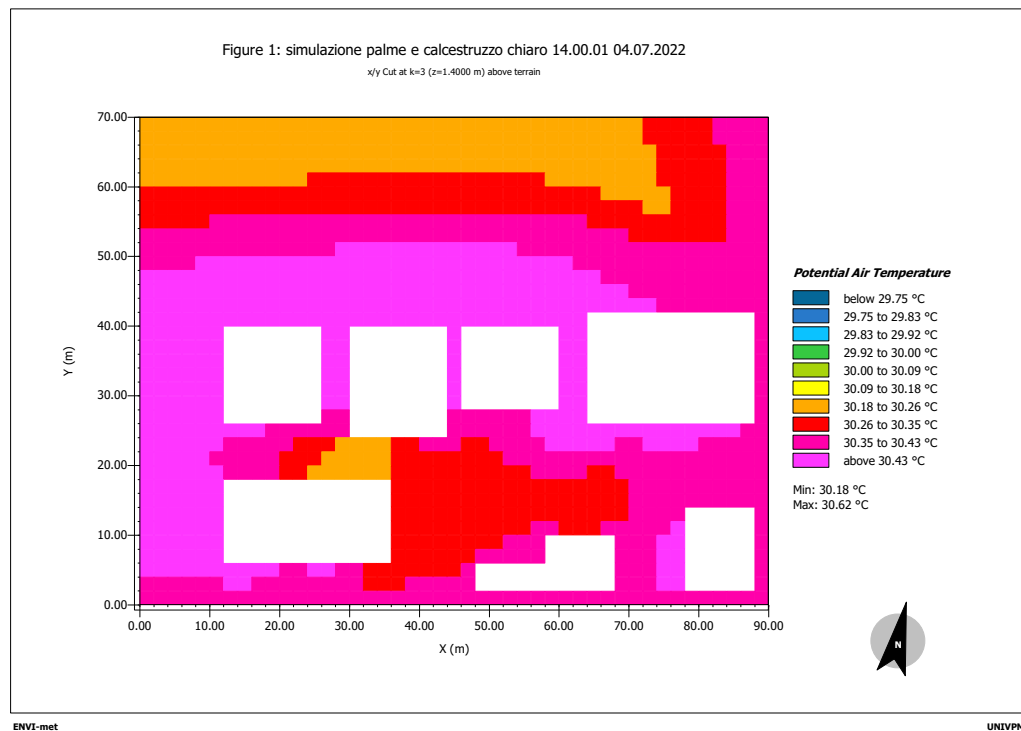


Figura 4.17 Output simulazione estiva stato finale visualizzato in Leonardo, ENVI-met-TEMPERATURA POTENZIALE DELL'ARIA

In questo caso, nonostante l'aggiunta delle palme, non è percepibile alcun cambiamento significativo della distribuzione della temperatura potenziale dell'aria rispetto al caso precedente questo riconferma lo scarso effetto mitigativo delle palme sulle temperature elevate.

L'unica differenza rispetto allo stato intermedio è riscontrabile nei valori della temperatura massima e minima: la prima risulta essere leggermente inferiore: 30.62°C (contro i precedenti 30.63°C) mentre la seconda leggermente superiore: 30.18°C (contro i precedenti 30.17°C). Questo significa che nonostante i diversi valori, il massimo gradiente di temperatura è rimasto invariato.

4.2.4 Indici di comfort termico PMV e PPD

A conferma dei risultati ricavati tramite l'analisi della temperatura potenziale dell'aria sono stati calcolati, per le tre simulazioni, anche i due indici di comfort termico: PMV e PPD.

Stato di fatto:

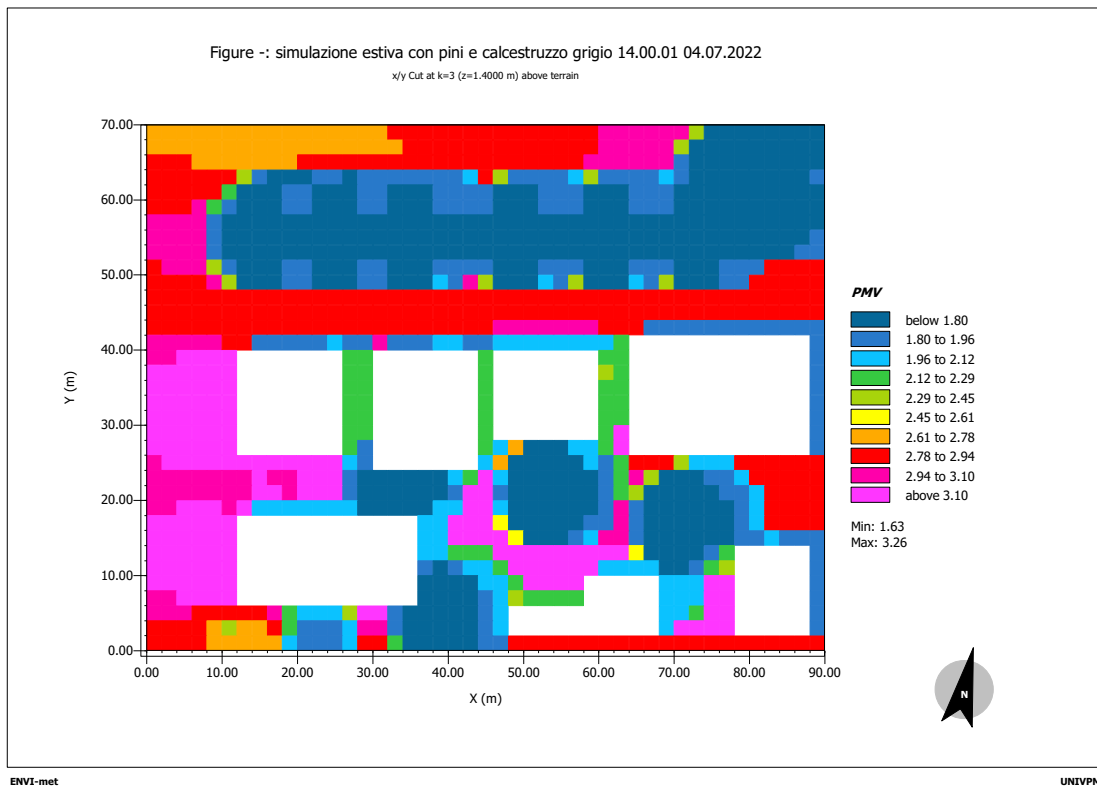


Figura 4.18 Output simulazione estiva stato di fatto visualizzato in Leonardo, ENVI-met-PMV

Nella situazione iniziale, in cui l'area è caratterizzata da pini e calcestruzzo grigio, si nota una netta differenza del valore dell'indice PMV che si registra in prossimità della vegetazione (presente sia lungo Via del Mare sia tra gli edifici a Sud dell'area) rispetto a quello in prossimità delle zone asfaltate, dei parcheggi delle abitazioni e della strada provinciale 227. Nel primo caso il valore del PMV si attesta al di sotto di 1.80 fino ad un massimo, in punti limitati, di 2.45: quindi, in prossimità del viale alberato, l'ambiente termico può essere valutato come leggermente caldo o al più caldo; al contrario nel secondo caso il valore del PMV arriva a toccare i 2.94 lungo la strada asfaltata di Via del Mare e i 3.10 in prossimità dei parcheggi e della strada provinciale quindi la situazione termica risulta essere molto calda, al limite dell'accettabile.

Questo è confermato dalla mappa cromatica dell'indice PPD, con il quale si quantifica la percentuale di insoddisfatti, il cui valore sarà maggiore esattamente negli stessi punti in cui il PMV risulta essere più alto: lungo la strada asfaltata di Via del Mare, nei parcheggi delle abitazioni e lungo la strada provinciale. Qui il valore del PPD si attesta intorno ai 95.63% mentre in prossimità della vegetazione varia tra 62.28% e 74.78%.

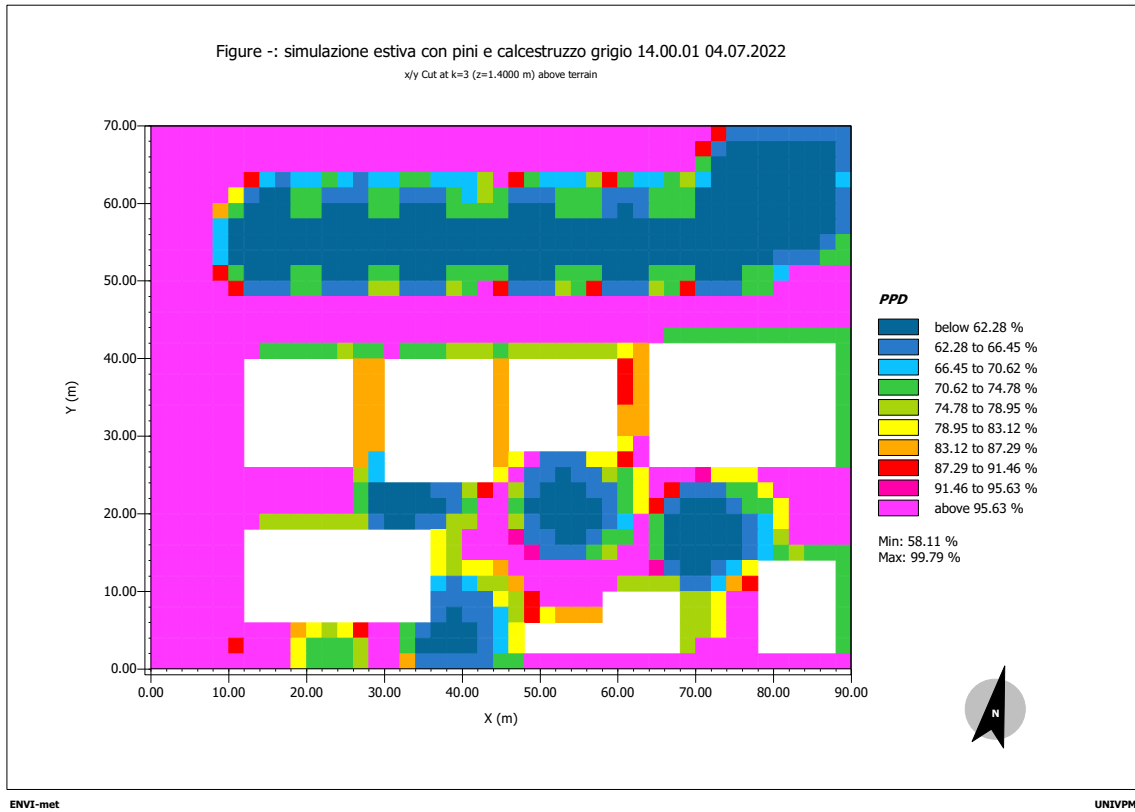


Figura 4.19 Output simulazione estiva stato di fatto visualizzato in Leonardo, ENVI-met-PPD

Stato intermedio:

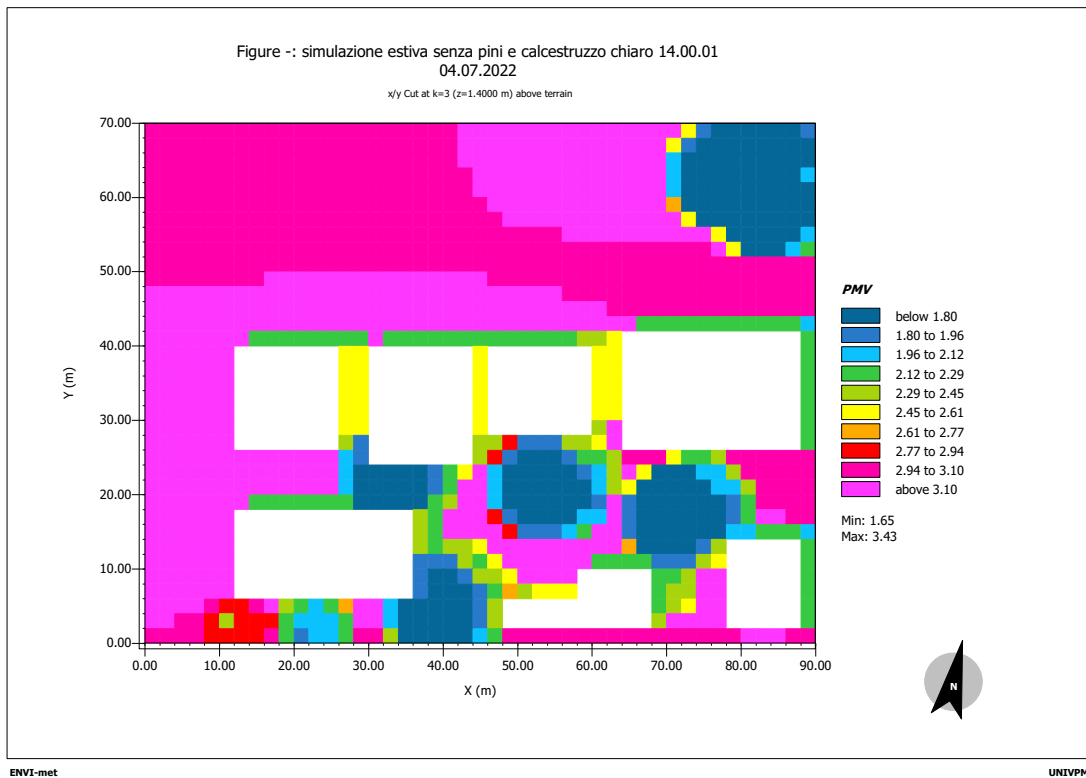


Figura 4.20 Output simulazione estiva stato intermedio visualizzato in Leonardo, ENVI-met-PMV

A seguito della rimozione dei pini, come si è precedentemente visto, si ha un aumento della temperatura potenziale dell'aria e questo comporta anche un aumento del PMV che si attesta al di sopra di 3.10 in quasi tutta l'area in esame eccetto a Sud dell'area dove il valore del PMV rimane pressoché invariato rispetto allo stato di fatto.

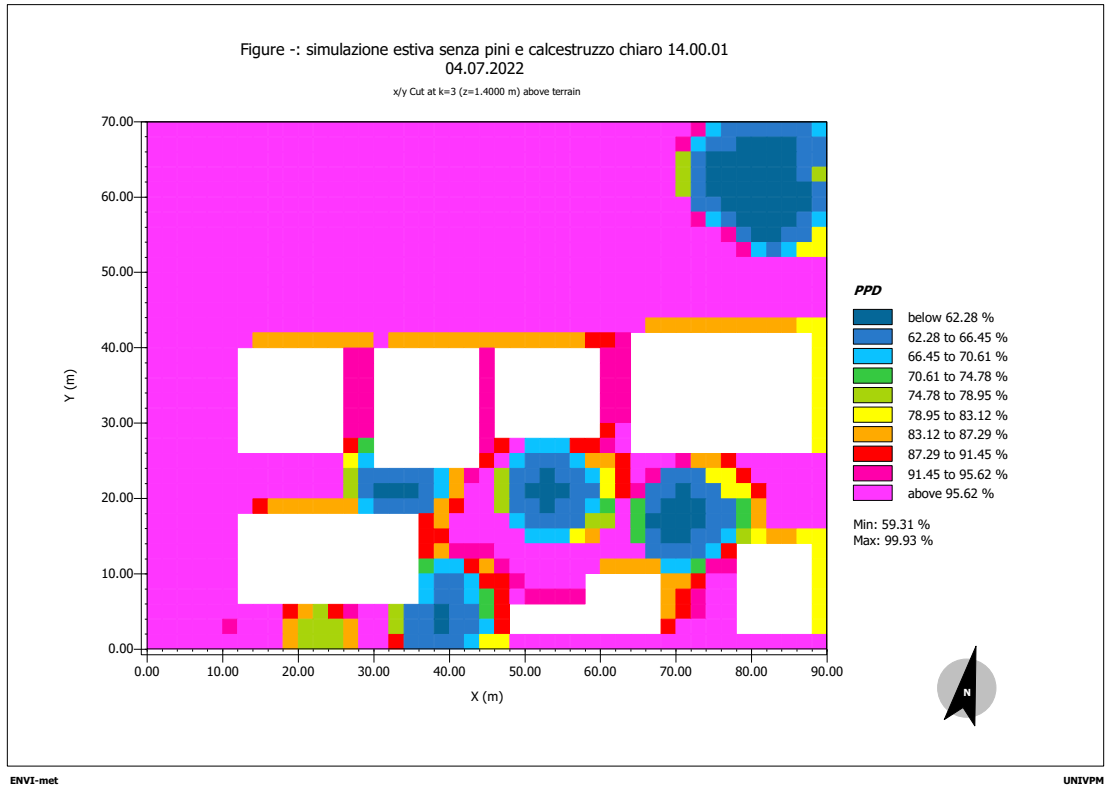


Figura 4.21 Output simulazione estiva stato intermedio visualizzato in Leonardo, ENVI-met-PPD

Anche in questo caso il valore del PPD va di pari passo con quello del PMV quindi si ha anche un aumento del PPD, rispetto allo stato di fatto, in quasi tutte le zone dove la percentuale di insoddisfatti risulta essere del 95.62%.

Stato finale

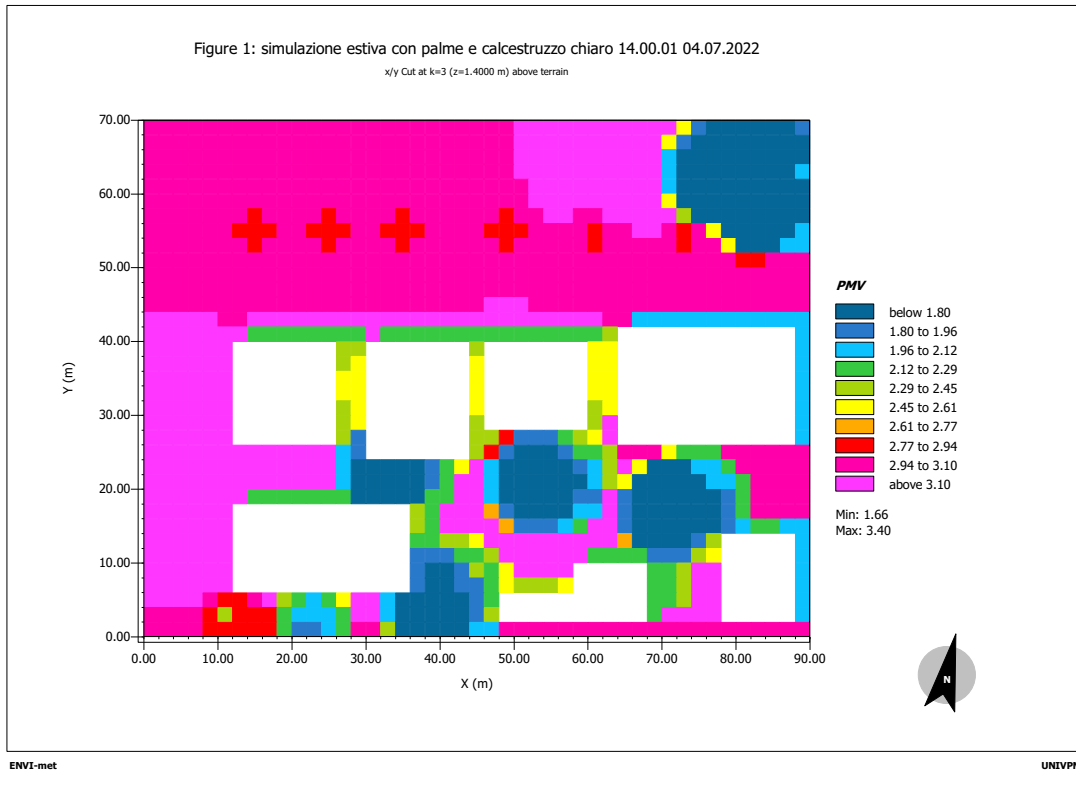


Figura 4.22 Output simulazione estiva stato finale visualizzato in Leonardo, ENVI-met-PMV

A seguito dell'introduzione delle palme il valore del PMV rimane invariato per tutta l'area rispetto allo stato intermedio eccetto per i punti in cui sono localizzate le palme, nei quali il PMV si abbassa leggermente ma non oltre i 2.77: valore indicativo di un ambiente caldo. Questo conferma lo scarso potere mitigativo delle palme e senz'altro inferiore a quello dei pini. Infatti, nonostante l'indice PMV sia leggermente diminuito rispetto al caso precedente la percentuale di insoddisfatti PPD rimane comunque invariata.

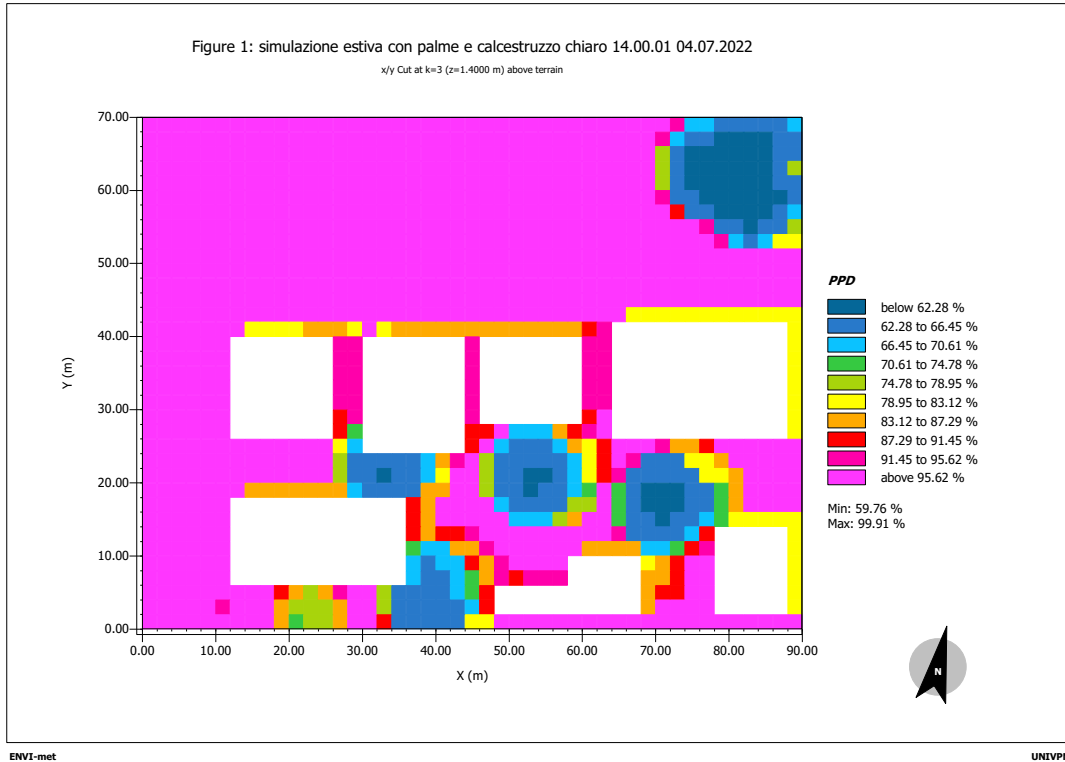


Figura 4.23 Output simulazione estiva stato finale visualizzato in Leonardo, ENVI-met-PPD

4.3 Simulazioni invernali

Anche per il giorno tipico invernale sono state condotte tre simulazioni: stato di fatto, stato intermedio e stato finale, al fine di verificare che la sostituzione del calcestruzzo grigio con quello chiaro e dei pini con le palme, prevista dalla riqualificazione in atto di Via del Mare, permetta di raggiungere anche in inverno una situazione di benessere termoigrometrico.

4.3.1 Stato di fatto

Anche in questo caso la mappa cromatica ottenuta con Leonardo rappresenta una sezione nel piano xy a 1.4 metri dal suolo ed è relativa al file output Atmosphere delle ore 14.00.01.

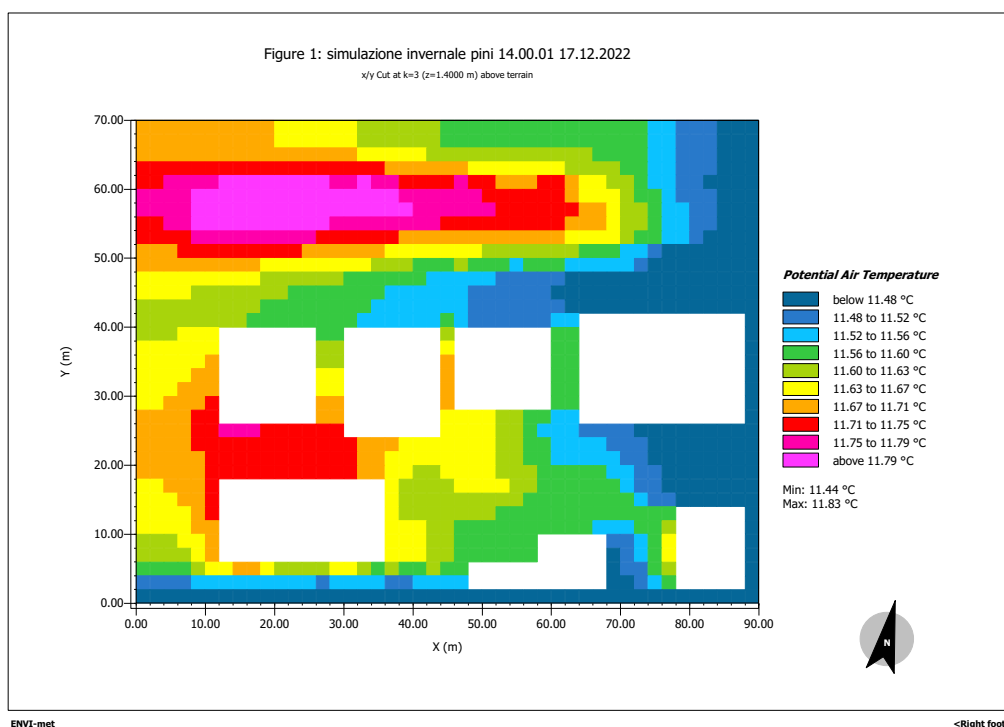


Figura 4.24 Output simulazione invernale stato iniziale visualizzato in Leonardo, ENVI-met
TEMPERATURA POTENZIALE DELL'ARIA

La temperatura potenziale dell'aria risulta compresa tra 11.48°C e 11.79°C. Il valore massimo registrato è di 11.83°C mentre quello minimo di 11.44°C quindi il massimo gradiente di temperatura non raggiunge nemmeno 1°C.

Confrontando la mappa cromatica dello stato di fatto estivo con quella dello stato di fatto invernale si nota, a primo impatto, un'inversione dei colori: le zone ad Est che nel caso estivo erano di colore magenta, rosa e quindi raggiungevano delle temperature elevate (30.26-30.43°C), nel caso invernale risultano le zone con una minore temperatura (colore ciano < 11.48°C); analogamente la zona che nel periodo estivo raggiungeva la temperatura inferiore ossia lo spiazzo di terreno argilloso ineditato (colore ciano <29.75°C) è la medesima zona che nel periodo invernale raggiunge le temperature più elevate (colore magenta >11.79°C).

Nel caso invernale c'è quindi una graduale diminuzione della temperatura a mano a mano che dal terreno argilloso non sigillato collocato a Nord-Ovest si passa alla strada. Tale gradiente di temperatura è dovuto di nuovo alla presenza dei pini che rendono il passaggio, da un valore all'altro della temperatura potenziale, meno netto. Anche in questo caso si risente dell'effetto canyon urbano ma i picchi di temperatura che vengono raggiunti nelle zone interposte tra gli edifici sono decisamente inferiori rispetto a quelli estivi.

Inoltre i canyon urbani presenti nell'area sia quelli Nord-Sud sia quelli Est-Ovest hanno lo stesso comportamento termico eccetto per il canyon urbano Est-Ovest posto all'estremo Ovest

dell'area in cui si raggiunge una temperatura maggiore rispetto agli altri due per la maggiore vicinanza relativa degli edifici che intensifica le riflessioni multiple e diminuisce lo SVF.

4.3.2 Stato intermedio

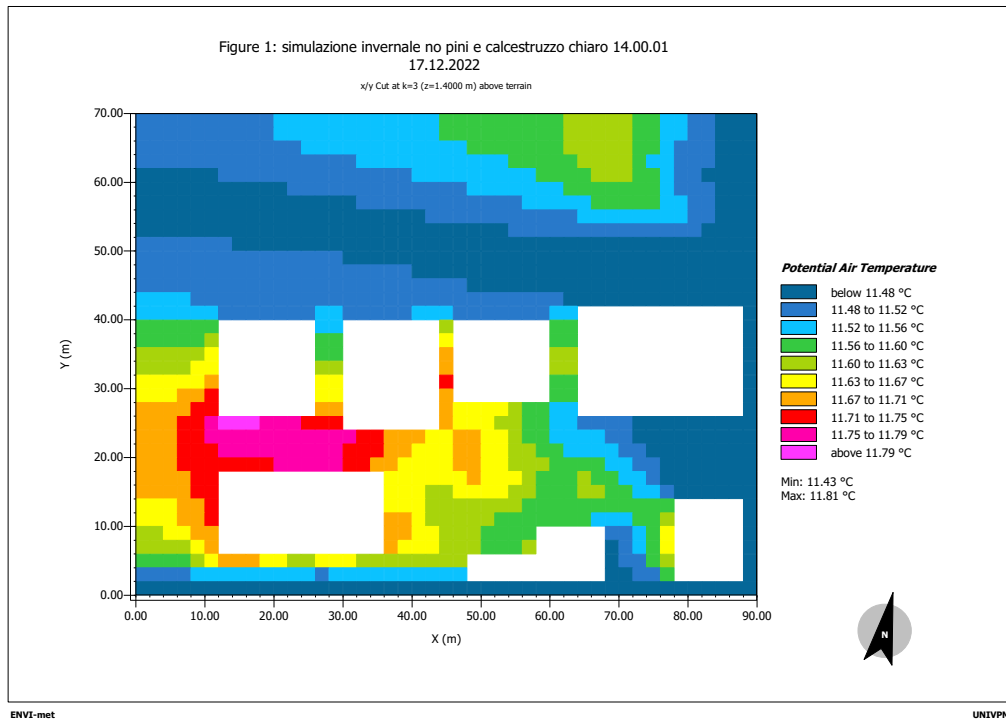


Figura 4.25 Output simulazione invernale stato intermedio visualizzato in Leonardo, ENVI-met
TEMPERATURA POTENZIALE DELL'ARIA

Dalla mappa cromatica relativa al file output Atmosphere delle ore 14.00.01 ottenuto dalla simulazione dello stato intermedio si nota come l'introduzione del calcestruzzo chiaro per il marciapiede e la rimozione dei pini elimina il graduale passaggio cromatico dallo spiazzale in terreno argilloso posto a Nord-Ovest alla strada posta al centro dell'area di studio. Infatti, in questo caso, tutta questa zona è caratterizzata da un'unica colorazione: ciano e azzurro chiaro (11.48°C-11.56°C) con una concentrazione di verde a Nord-Est dove ci sono dei pini.

La temperatura più elevata (magenta >11.79°C) si registra invece a Sud-Ovest per la presenza del canyon urbano Est-Ovest oltre che per la vicinanza della strada provinciale e la presenza di parcheggi privati delle abitazioni.

Il canyon urbano Est-Ovest prosegue fino all'estremo sudorientale dell'area anche se qui la temperatura risulta diminuire gradualmente fino a raggiungere valori minimi (colore ciano <11.48°C) in prossimità dello spiazzale adibito a parcheggio adiacente le abitazioni.

La minima temperatura registrata è pari a 11.43°C mentre la massima è di 11.81°C quindi una differenza irrisoria rispetto ai valori massimi e minimi del caso precedente.

4.3.3 Stato finale

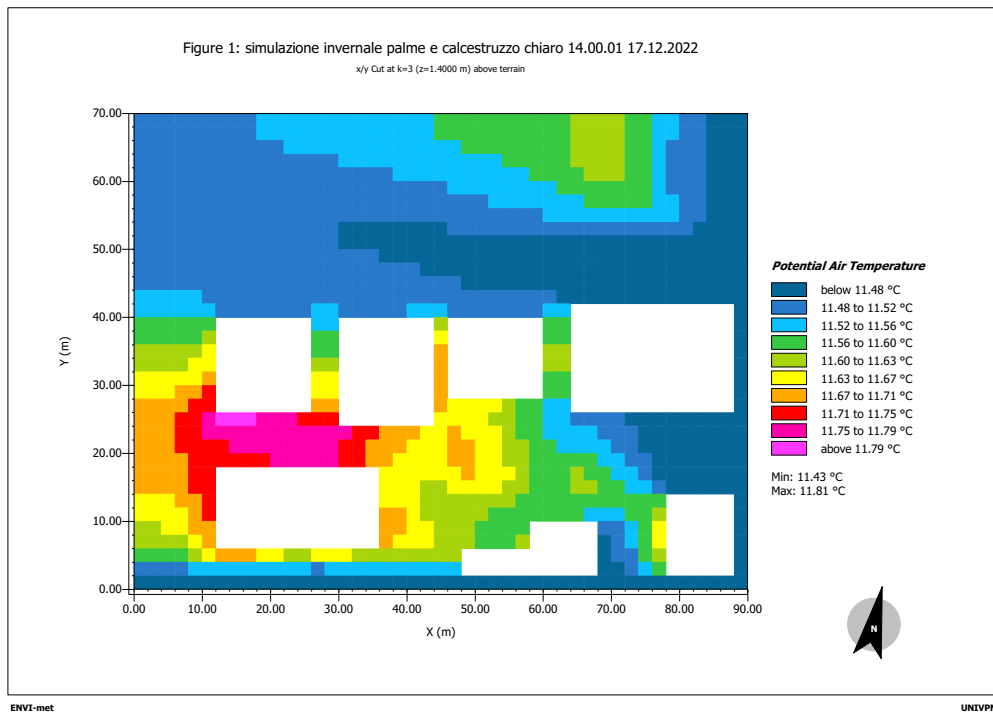


Figura 4.26 Output simulazione invernale stato finale visualizzato in Leonardo, ENVI-met TEMPERATURA POTENZIALE DELL'AREA

Anche in questo caso, come in quello estivo, l'aggiunta delle palme non comporta differenze evidenti nei valori della temperatura potenziale dell'aria quindi le mappe cromatiche dello stato intermedio e dello stato finale risultano identiche come anche le temperature massime e minime.

Per quanto riguarda i canyon urbani presenti nell'area, a differenza del periodo estivo in cui si registra una differenza importante tra il comportamento del canyon urbana est-ovest (più fresco) e quelli nord sud (più caldi) nelle tre simulazioni del periodo invernale le temperature potenziali raggiunte nel canyon urbano est-ovest si equivalgono a quelle raggiunte nei canyon urbani nord-sud.

Capitolo 5

CONCLUSIONI

Una volta inquadrato l'argomento di studio è stata effettuata un'analisi dell'effetto mitigativo della vegetazione sull'isola di calore urbana in Via del Mare a Porto d'Ascoli in provincia di San Benedetto del Tronto.

Grazie ai risultati ottenuti tramite il software di simulazione microambientale tridimensionale ENVI-met si sono ottenute delle linee guida per la progettazione dell'intervento di riqualificazione previsto per l'area in esame. Innanzitutto, è indubbio l'effetto mitigativo della vegetazione sull'isola di calore urbana, infatti, si nota un evidente incremento della temperatura a seguito dell'abbattimento dei pini, è però vero che qualora tali pini vengano sostituiti con delle palme l'effetto mitigativo non risulta analogo ma anzi si registra un peggioramento delle condizioni climatiche. Questo è legato alle diverse proprietà delle due specie arboree che comportano una diversa efficienza dei processi di ombreggiamento ed evapotraspirazione: entrambi minori nelle palme rispetto ai pini.

Inoltre, l'aver condotto la simulazione sia in estate che in inverno ha permesso di evidenziare un'inversione nel comportamento termico dell'area con, nel periodo invernale, valori della temperatura potenziale dell'aria elevati in punti dove, nel periodo estivo erano bassi e viceversa. Questo è riconducibile alle diverse proprietà termiche dei materiali edilizi (cemento e asfalto) rispetto a quelli naturali in particolare alla diversa capacità termica, intesa come la quantità di calore accumulato, maggiore nell'asfalto piuttosto che nel terreno argilloso, che viene successivamente rilasciato all'ambiente circostante con una velocità differente determinando in tal modo un gradiente di temperatura tra le zone piantumate e quelle edificate.

Questo elaborato permette quindi di dimostrare che la vegetazione è un ottimo strumento di mitigazione delle ondate di calore qualora esso venga usato nella maniera adeguata e permette di migliorare sensibilmente il fenomeno dell'isola di calore urbana.

Per tale motivo risulta fondamentale affiancare sempre alla pianificazione urbanistica anche un'attenta organizzazione del verde urbano guidata da un apposito strumento presente all'interno del Piano Regolatore generale (PRG), chiamato Piano del Verde Comunale, in quanto la vegetazione non deve più essere considerata come un mero strumento decorativo e una fonte di inutile dispendio economico per le amministrazioni comunali ma come uno strumento utile, o per meglio dire necessario, ad una migliore qualità della vita in città.

BIBLIOGRAFIA

T.R. Oke "Boundary Layer Climates" (1987)

T.R. Oke "Applied Climatology: Principles & Practices" (1997)

P.A. Kassomenos, B.D. Katsoulis "Mesoscale and macroscale aspects of the morning Urban Heat Island around Athens, Greece" (2006)

Haider Taha "Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat" (1997)

T.R. Oke "The Energetic Basis of the Urban Heat Island" (1982)

"Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies" U.S. EPA

Luke Howard "The Climate of London" (1818)

Gordon Manley "Quarterly Journal of the Royal Meteorology Society" (1958)

Helmut Landsberg "The Urban Climate" (1981)

T.R. Oke "The Heat Island of the Urban Boundary Layer: Characteristics, Causes and Effects" (1995)

J.A. Voogt, T.R. Oke, "Thermal Remote Sensing of Urban Climates. Remote Sensing of Environment" (2003)

Bayer P. et al. "Subsurface urban heat islands in German cities" (2013)

Zhiwen Luo, Christina Asproudi “Subsurface urban heat island and its effects on horizontal ground-source heat pump potential under climate change” (2016)

T.R. Oke “Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites” (2004)

Stull, R.B. “An Introduction to Boundary Layer Meteorology.” (1988)

Fuss et al. “Betting on negative emissions” (2014)

Yunus A. Çengel “Termodinamica e trasmissione del calore” IV edizione

Richard G. Allen, Luis S. Pereira, Dirk Raes, Martin Smith. “Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage” FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma (1998)

“Analisi del comportamento energetico di un fabbricato-tipo in assenza/presenza di tetto/parete verde per ottimizzare l’efficienza energetica degli edifici in area urbana” Fabio Fantozzi, Carlo Bibbiani, Caterina Gargari ENEA 2014

Juan P. Montávez, Antonio Rodríguez, Juan I. Jiménez “A study of the Urban Heat Island of Granada” (2000)

John M. Sharp, Jr. “The impacts of urbanization on groundwater systems and recharge” (2010)

Salamanca et al. “Anthropogenic Heating of the Urban Environment due to Air Conditioning” (2013)

H. Akbari, M. Pomerantz e H. Taha “Cool Surfaces and Shade Trees to Reduce Energy Use and Improve Air Quality in Urban Areas” (2001)

T.R. Oke “Street Design and Urban Canopy Layer Climate” (1988)

M. Nunez, T.R. Oke “The Energy Balance of an Urban Canyon” (1977)

After Erell et al, “Urban Microclimate” (2011)

M. Rafieian; H.Rezaei Rad; A. Sharifi “The Necessity of using Sky View Factor in Urban Planning: a Case Study of Narmak Neighborhood, Tehran Mojtaba Rafieian, Hadi Rezaei Rad, Ayyoob Sharifi” (2014)

K.P. Gallo et al. in “The use of a vegetation index for assesment of the urban heat island” (2007)

Qihao Weng, Dengsheng Lu e Jaquelyn Schubring “Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies” (2004)

Goggins et al. “Effect Modification of the Association between Short-term Meteorological Factors and Mortality by Urban Heat Islands in Hong Kong.” (2012)

Murage et al. “Effect of night-time temperatures on cause and age-specific mortality in London” (2017)

UNI EN ISO 7730:2006 Ergonomia degli ambienti termici - Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale

P. Höppe “The physiological equivalent temperature - a universal index for the biometeorological assesment of the thermal environment” (1999)

M. Santamouris “On the energy impact of urban heat island and global warming on buildings” (2014)

S.A. Changnon., R.G. Semonim, A.H. Auer., R.R. Braham, J. Hales “METROMEX: A Review and Summary. Mateormonogr” (1981)

“Patterns and Causes of Atlanta's Urban Heat Island–Initiated Precipitation” P. Grady Dixon, L. Mote Thomas (2003)

Shi Zhong et al. “A case study of urbanization impact on summer precipitation in the Greater Beijing Metropolitan Area: Urban heat island versus aerosol effects” (2015)

Lee et al. “Examination of aerosol effects on precipitation in deep convective clouds during the 1997 ARM summer experiment” (2008)

- Wei-Kuo Tao et al. "Impact of aerosols on convective clouds and precipitation" (2012)
- B.M. Steensen et al. "Future urban heat island influence on precipitation" (2022)
- Giannakopoulos C., Hatzai M., Kostopoulou E., McCarty M., Goodess C. "The impact of climate change and urban heat islands on the occurrence of extreme events in cities. The Athens case" (2010)
- Santamouris M., Papanikolaou N., Livada I., Koronakis I., Georgakis A., Assimakopoulos D.N. "On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings" (2001)
- M. Santamouris et al. "In Advances in the Development of Cool Materials for the Built Environment" (2013)
- Razzaghmanesh et al. "Air temperature reduction at the base of tree canopies" (2021)
- Razzaghmanesh et al. "T. The role of green roofs in mitigating Urban Heat Island effects in the metropolitan area of Adelaide, South Australia. Urban For. Urban Green" (2016)
- Littlefair et al. "Environmental Site Layout Planning: Solar Access, Microclimate and Passive Cooling in Urban Areas" (2000)
- G. Scudo, J.M.O de la Torre "Spazi verdi urbani" (2003)
- D.Lgs 42/2004 Codice dei beni culturali e del paesaggio, ai sensi dell'articolo 10 della legge 6 luglio 2002, n. 137
- Regolamento UE 1143/2014 recante disposizioni volte a prevenire e gestire l'introduzione e la diffusione delle specie esotiche invasive
- R.A. Spronken-Smith e T.R. Oke "The thermal regime of urban parks in two cities with different summer climates" (1994)
- D.M. 1444/68 Limiti inderogabili di densità edilizia, di altezza, di distanza fra i fabbricati e rapporti massimi tra gli spazi destinati agli insediamenti residenziali e produttivi e spazi pubblici o riservati alle attività collettive, al verde pubblico o a parcheggi, da osservare ai fini

della formazione dei nuovi strumenti urbanistici o della revisione di quelli esistenti, ai sensi dell'art. 17 della legge n. 765 del 1967

Legge 10/2013 “Norme per lo sviluppo degli spazi verdi urbani”

Andrea Giacchetta docente di progettazione bioclimatica facoltà di architettura di Genova
UNI 11160:2005 Linee guida per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo di sistemi antirumore per infrastrutture di trasporto via terra

Beckett et al. “Particulate pollution capture by urban trees: effect of species and windspeed” (2001)

Malcevski et al. “Green Infrastructures and ecological reconstruction in urban and peri-urban areas” (2016)

DIRETTIVA 2009/28/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE

D.Lgs. 28/2011 Attuazione della direttiva 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE

Spronken-Smith e Rachel A. “Energetics and cooling in urban parks” (1994)

Jauregui con il suo studio “Influence of a large urban park on temperature and convective precipitation in a tropical city” (1990-1991)

Victor L. Barradas “The Urban Tree as a Tool to Mitigate the Urban Heat Island in Mexico City: A Simple Phenomenological Model” (2016)

Honjo e Takakura “Simulation of Thermal Effects of Urban Green Area on their Surrounding Areas” (1991)

F. Kong et al “Effects of spatial pattern of greenspace on urban cooling in a large metropolitan area of eastern China” (2014)

T.R. Oke “The Micrometeorology of the Urban Forest” (1989)

“Reductions in air conditioning energy caused by a nearby park” Vu Thanh Ca et al. 1998

Kawahsima “Relation between vegetation, surface temperature, and surface composition in the tokyo region during winter” (1994)

Limor Shashua-Bar et al. “Microclimate modelling of street tree species effects within the varied urban morphology in the Mediterranean city of Tel Aviv, Israel” (2010)

H. Upmanis et al. nella ricerca “The influence of green areas on nocturnal temperatures in a high latitude city (Göteborg, Sweden)” (1998)

Hideki Takebayashi e Masakazu Moriyama “Study on the urban heat island mitigation effect achieved by converting to grass-covered parking” (2009)

Ca et al. “Reductions in air conditioning energy caused by a nearby park” (1998)

Onishi A. et al. “Evaluating the potential for urban heat-island mitigation by greening parking lots” (2010)

“Linee guida per la gestione sostenibile delle acque meteoriche Provincia autonoma di Bolzano”

R. Bouzouidja et al. “Experimental Comparative Study between Conventional and Green Parking Lots: Analysis of Subsurface Thermal Behavior under Warm and Dry Summer Conditions” (2019)

Piano del Verde del Comune di Padova

EN 1176 “Attrezzature e superfici per aree da gioco” EN 1177 “Rivestimenti di superfici di aree da gioco”

UNI 11123:2004 “progettazione dei parchi e aree da gioco all’aperto”

Teemusk e Mander “Greenroof potential to reduce temperature fluctuations of a roof membrane: A case study from Estonia” (2009)

Wong et al. “The effects of rooftop garden on energy consumption of a commercial building in Singapore” (2003)

Brad Bass et al. “Mitigating the Urban Heat Island with Green Roof Infrastructure” (2000)

UNI 11235-2015 “Istruzioni per la progettazione, l’esecuzione, il controllo e la manutenzione di coperture a verde”

Peng e Jim “Green-roof effects on neighborhood microclimate and human thermal sensation”
2013

Lazzarin, Castellotti e Buscato “Experimental measurements and numerical modeling of a green roof” (2004)

Marta Bisson, “Simulazione del microclima urbano di Milano mediante il software ENVI-met-Studio degli effetti dell’inserimento di aree verdi sulla sollecitazione termica degli edifici” A.A.
2009/2010

SITOGRAFIA

<https://www.wikipedia.org/>

<https://www.epa.gov/>

<https://www.enea.it/it>

<https://www.inail.it/cs/internet/home.html>

<https://www.fao.org/home/en>

<https://www.istat.it/en/>

<https://prodottiesoluzioni.indexspa.it/>

<https://www.ambienteitalia.it/>

<http://app.protezionecivile.marche.it/sol/indexjs.sol?lang=it>

<https://www.regione.marche.it/Regione-Utile/Paesaggio-Territorio-Urbanistica/Cartografia/Repertorio/Cartatecnica numerica 110000>

<https://www.envi-met.com/it/formazione-assistenza/>

http://www.arpalazio.net/main/aria/didattica/corso01/Micro_meteo_08_2011.pdf

<https://docs.dicatchpoliba.it/filemanager/417/Isola%20calore%20e%20bilancio%20energetico.pdf>

<http://landezine.com/index.php/2013/01/nse-kitakyushu-technology-center-by-platdesign/>

<https://landezine.com/venlo-talentencampus-by-carve-landscape-architecture/>

<https://landezine.com/constitution-avenue-canberra-by-jane-irwin-landscape-architecture/>

www.proludic.it

<https://www.orticola.org/?p=9947>

<https://prodottiesoluzioni.indexspa.it/>

<https://www.google.com/maps>

RINGRAZIAMENTI

Ai miei genitori per essere stati pazienti.

A mia mamma per avermi insegnato che la resa non è contemplabile.

A mio papà per i caldi sguardi di conforto nei momenti più difficili.

A mia sorella Giulia per l'esempio di coraggiosa resilienza.

A Serena, per la genuinità nello spronarmi e nel condividere i miei traguardi come fossero propri.

Alle mie amiche di sempre Francesca, Ilaria e Adele per essere rimaste fedeli alla nostra amicizia nonostante gli anni, la distanza e le mie prolungate assenze.

Al mio relatore Giorgio Passerini e alla mia correlatrice Alessandra Chiappini per aver creduto in me fin dall'inizio e per avermi accompagnato con gentilezza ed estrema disponibilità in quest'ultima fase del mio percorso.

A tutti i professori che ho incontrato durante questi anni universitari per avermi insegnato cosa significhi la dedizione e la passione per il proprio lavoro. Porto nel mio cuore ognuno di voi.

Alla me del passato che non avrebbe mai pensato di farcela.