

The background of the entire page is a topographic map with blue contour lines of varying thickness and spacing, creating a complex, organic pattern of hills and valleys. The lines are more densely packed in some areas, indicating steeper slopes, and more widely spaced in others, indicating flatter terrain. The overall color palette is a range of blue tones, from light sky blue to a darker, more saturated blue.

MITIGARE L'ISOLA DI CALORE URBANA: IL RUOLO DEI CAMPUS UNIVERSITARI

**Il caso studio della sede centrale
del Politecnico di Torino**

**Tesi di Laurea Magistrale
Davide Pio**



**Politecnico
di Torino**

Corso di Laurea Magistrale in Architettura per il Progetto Sostenibile
A.A. 2022/2023
Sessione di Luglio 2023

**Mitigare l'isola di calore urbana: il ruolo dei
campus universitari**

Il caso studio della sede centrale del Politecnico di Torino

Relatore:

Prof. Arch. R. Pollo

Co-relatori:

Ph.D. Student M. Trane

Ph.D. Arch. C. Genta.

Candidato:

Pio Davide

INDICE

| | |
|----------------------------|------------|
| /ABSTRACT | VI |
| RESEARCH QUESTION | X |
| \SUB-RESEARCH | XI |
| "LISTA DELLE FIGURE | XII |

/01 **ADATTAMENTO CLIMATICO E MITIGAZIONE DEL MICROCLIMA**

| | |
|---|-----------|
| 0.0 climate change | 2 |
| 1.1 adattarsi al clima che cambia | 6 |
| 1.2 mitigare gli effetti di un clima che cambia | 10 |
| 1.3 l'Agenda 2030 e climate action | 16 |
| 1.3.1 European Green Deal e climate action | 25 |
| 1.4 il ruolo delle città per l'adattamento e la mitigazione | 29 |
| 1.5 il ruolo dei campus per l'adattamento e la mitiga- zione | 35 |
| 1.5.1 Campus Bonardi - Milano | 38 |
| 1.5.2 SciencesPO - Parigi | 44 |
| 1.5.3 La Playita Garden - Messico | 48 |
| 1.5.4 Rodda Lane - Melbourne | 52 |
| 1.5.5 La Sapienza - Roma | 56 |
| 1.6 l'esempio del Green-Team PoliTO | 60 |

/02 BACKGROUND E METODOLOGIA

| | |
|---|------------|
| 2.1 misurare i progressi verso l'Agenda 2030 | 65 |
| 2.1.1 monitoraggio nei campus universitari | 68 |
| 2.2 città, microclima e contributo agli SDGs | 73 |
| 2.2.1 la simulazione del microclima e del comfort | 80 |
| 2.3 la scala della simulazione | 81 |
| 2.4 strategie di adattamento e mitigazione | 83 |
| 2.5 il microclima | 88 |
| 2.5.1 Urban Heat Island | 91 |
| 2.6 Il comfort termico outdoor | 93 |
| 2.7 gli indici di comfort termico | 95 |
| 2.8 la qualità dell'aria | 100 |

/03 ENVI-MET

| | |
|---|------------|
| 3.1 introduzione al software ENVI-met | 105 |
| 3.2 condizioni meteorologiche al contorno | 110 |
| 3.3 flussi dei veicoli a motore | 112 |
| 3.4 modellazione dell'area allo stato di fatto | 118 |
| 3.4.1 simulazione dell'area allo stato di fatto | 122 |
| 3.5 modellazione e simulazione del masterplan di ateneo | 124 |

/04 CASO STUDIO: LA SEDE CENTRALE DEL POLITECNICO DI TORINO

| | |
|---|------------|
| 4.1 introduzione | 130 |
| 4.2 inquadramento storico | 134 |
| 4.3 inquadramento geografico | 142 |
| 4.3.1 l'isola di calore urbana a Torino | 146 |
| 4.3.2 qualità dell'aria a Torino | 150 |
| 4.4 analisi del costruito - stato di fatto | 152 |
| 4.4.1 analisi degli spazi outdoor | 164 |
| 4.5 analisi della vegetazione | 170 |
| 4.6 masterplan di ateneo - analisi del costruito | 176 |
| 4.6.1 analisi degli spazi outdoor e della vegetazione | 182 |
| 4.7 stato di fatto vs masterplan di ateneo | 188 |
| 4.8 la futura sede centrale dell'ateneo | 190 |

/05 SIMULAZIONI E LETTURA DEI RISULTATI

| | |
|---|------------|
| 5.1 output | 193 |
| 5.2 temperatura dell'aria | 194 |
| 5.3 temperatura superficiale | 198 |
| 5.4 velocità del vento | 202 |
| 5.5 physiological equivalent temperature | 206 |
| 5.6 particolato atmosferico | 210 |
| 5.7 confronto dei delta di P.E.T. e t. superficiale | 212 |
| 5.8 analisi dei dati di output | 214 |
| 5.9 criticità delle singole variabili | 224 |
| 5.10 considerazioni e discussioni | 227 |

/06 I PROGRESSI VERSO L'AGENDA 2030 E VISIONE FUTURA

| | |
|--|------------|
| 6.1 Il legame tra microclima e SDGs | 233 |
| 6.2 potenziali progressi | 235 |
| 6.3 prospettive future/ nature based solutions | 238 |
| 6.4 applicazione nbs al Politecnico | 250 |

| | |
|---------------------|------------|
| /CONCLUSIONI | 262 |
|---------------------|------------|

| | |
|-----------------------------------|------------|
| BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA | 264 |
|-----------------------------------|------------|

/ABSTRACT

ITA

La ricerca analizza il tessuto urbano dell'area della sede centrale del Politecnico di Torino, caratterizzato da una forte urbanizzazione e consumo di suolo, nonché da un elevato passaggio di veicoli a motore e le sue condizioni microclimatiche che si manifestano nella stagione estiva. In particolare mette a confronto le caratteristiche architettoniche e morfologiche della sede dell'università pre e post gli interventi del Masterplan di Ateneo con l'obiettivo di determinarne gli effetti che essi hanno sul microclima e il comfort termico outdoor; si propone, inoltre, di individuare gli eventuali punti critici ove applicare soluzioni nature based al fine di migliorare le condizioni di benessere degli occupanti degli spazi esterni nei mesi estivi, dove le temperature sono sempre più torride. L'approccio metodologico si articola in diverse fasi, la prima coincide con il background scientifico sui concetti di adattamento, mitigazione e cambiamento climatico, seguito dall'introduzione all'Agenda 2030 e al Green Deal Europeo. Si indaga, in questa fase, il ruolo svolto dalle realtà universitarie nella definizione degli obiettivi per uno sviluppo sostenibile ed i progressi raggiunti. Seguono le best practices su casi studio di interventi architettonici rivolti alla mitigazione del clima nei campus universitari, dove le università assumono ruolo di test bed ideali per la sperimentazione di soluzioni di adattamento e resilienza climatica. La seconda parte dell'elaborato introduce gli approcci delle università per affrontare le sfide del cambiamento climatico. Da un lato la misurazione dei progressi, delle performance globali dei campus tramite il reporting, dall'altro viene introdotta la simulazione microclima come strumento fondamentale per quantificare i potenziali effetti positivi degli interventi urbanistici sui parametri del comfort outdoor.

Nella terza fase, dopo le nozioni teoriche legate al concetto di microclima e comfort termico outdoor, viene introdotto il software ENVI-met tramite il quale sono state condotte le due simulazioni del caso studio, riportandone i principi di funzionamento e l'iter di modellazione e simulazione.

Se il quarto capitolo è inizialmente incentrato sull'introduzione del caso studio, con un focus sulla morfologia dei volumi e le peculiarità degli spazi aperti, la seconda parte riporta il confronto qualitativo dettagliato del campus pre e post masterplan. La ricerca prosegue riportando gli outputs della simulazione

dove vengono riportate temperature superficiali e dell'aria, PET, direzione del vento e concentrazione del particolato. Ne segue l'ultimo confronto tra post e ante del Politenico, da cui si evince un diffuso miglioramento dei valori dei parametri considerati seppur non sufficiente a rendere confortevoli la maggior parte degli spazi esterni dell'università. L'ultima riflessione riguarda le aree risultate particolarmente critiche, ove sono state pensate le applicazioni di alcune nature based solution, per poter rendere piacevoli quegli spazi nei caldi mesi estivi.

/ABSTRACT

ENG

The research analyses the urban setting of the Politecnico di Torino's headquarters area, characterised by heavy urbanisation and land consumption, as well as by a high passage of motor vehicles, and its microclimatic conditions during the summer season. In particular, it compares the architectural and morphological characteristics of the university building before and after the interventions of the University Master Plan with the aim of determining the effects they have on the microclimate and outdoor thermal comfort; it also proposes to identify any critical points where to apply nature-based solutions in order to improve the well-being conditions of the occupants of outdoor spaces in the summer months, when temperatures are increasingly torrid.

The methodological approach is divided into several phases, the first coinciding with the scientific background on the concepts of adaptation, mitigation and climate change, followed by an introduction to the 2030 Agenda and the European Green Deal. In this step, the role played by universities in defining the goals for sustainable development and the progress achieved is investigated. This is followed by best practices on case studies of architectural interventions aimed at climate mitigation on university campuses, where universities take on the role of ideal test beds for the experimentation of climate adaptation and resilience solutions. The second part of the paper introduces universities' approaches to addressing the challenges of climate change. On the one hand, the measurement of progress and overall campus performance through reporting, and on the other hand, microclimate simulation is introduced as a fundamental tool to quantify the potential positive effects of urban interventions on outdoor comfort parameters.

In the third section, after the theoretical notions related to the concept of microclimate and outdoor thermal comfort, the ENVI-met software is introduced through which the two simulations of the case study were conducted, reporting its operating principles and the modelling and simulation process.

If the fourth chapter is initially focused on the introduction of the case study, with a focus on the morphology of the volumes and the peculiarities of the open spaces, the second part reports the detailed qualitative comparison of the pre and post masterplan campus. The research goes on to report the simulation outputs where surface and air temperatures, PET, wind direction and particulate

concentration are reported. This is followed by the last comparison between post and ante of the Politenico, which shows a widespread improvement in the values of the parameters considered, although not enough to make most of the university's outdoor spaces comfortable. The last reflection concerns the areas found to be particularly critical, where applications of some nature-based solutions have been designed to make those spaces pleasant in the hot summer months.

|RESEARCH QUESTION

**QUALI APPROCCI E STRATEGIE POSSONO
ADOTTARE LE UNIVERSITÀ PER DIVENTARE
TEST BED IDEALI PER LA SPERIMENTAZIONE
DI SOLUZIONI PILOTA DI MITIGAZIONE DELLE
ISOLE DI CALORE URBANO?**

**IN CHE MODO IL MICROCLIMA INFLUISCE
SUL COMFORT AMBIENTALE OUTDOOR ?**

\SUB-RESEARCH QUESTIONS

COME LE TECNICHE DI SIMULAZIONE DEL MICROCLIMA POSSONO SUPPORTARE LA PROGETTAZIONE A LIVELLO URBANO?

QUALI STRATEGIE POSSONO ESSERE USATE PER LA MITIGAZIONE DEGLI EFFETTI DELLE ISOLE DI CALORE URBANO?

QUAL È IL RUOLO DELLE UNIVERSITÀ NELLA DEFINIZIONE E RAGGIUGIMENTO DEI TRAGUARDI DELL'AGENDA 2030

"LISTA DELLE FIGURE

- Figura 0.0.1 Immagine di Una barca sul fondo di un ex lago prosciugato in Turchia.
- Figura 1.1.1 Unità esterne di condizionatori su facciate di un palazzo in Cina
- Figura 1.1.2 Paratia mobile del MOSE di Venezia
- Figura 1.2.1 Solar farm nel Regno Unito
- Figura 1.2.2 Parco eolico off shore nel mare del Nord
- Figura 1.3.1 SDG 3
- Figura 1.3.2 SDG 11
- Figura 1.3.3 SDG 13
- Figura 1.3.4 I 17 SDGs
- Figura 1.4.1 Metropol Parasol a Siviglia nella Plaza de la Encarnación
- Figura 1.5.1.1 Copertura di vetro, con pannelli fotovoltaici integrati
- Figura 1.5.1.2 Architectural Model Lab
- Figura 1.5.1.3 Giardino Perterre e lobby degli studenti
- Figura 1.5.1.4 Giardino Perterre e lobby degli studenti
- Figura 1.5.1.5 Tettoia di vetro, con pannelli fotovoltaici integrati e main building
- Figura 1.5.2.1 Dettaglio gradoni corte ipogea principale
- Figura 1.5.2.2 Render schermatura solare di tessuto distesa
- Figura 1.5.2.3 Corte ipogea e nuovo edificio per aule studio
- Figura 1.5.3.1 Vista complessiva della corte e delle strutture di acciaio con la vegetazione
- Figura 1.5.3.2 Dettaglio dei percorsi interni ombreggiati
- Figura 1.5.3.3 Vista complessiva della corte e delle strutture di acciaio con la vegetazione
- Figura 1.5.4.1 Vista complessiva della corte e delle strutture di acciaio
- Figura 1.5.4.2 Dettaglio delle strutture per la schermatura solare
- Figura 1.5.4.3 Dettaglio delle strutture per la schermatura solare
- Figura 1.5.5.1 Scenario 0
- Figura 1.5.5.2 Scenario 1
- Figura 1.5.5.3 Scenario 3
- Figura 1.6.1 Logo del Campus Sostenibile
- Figura 2.2.1 Collegamento tra la mitigazione delle UHI e i target degli SDGs
- Figura 2.2.2 Modelli microclimatici e supporto alla misurazione degli indicatori degli SDGs
- Figura 2.4.1 Copertura verniciata di bianco di un grande supermercato a Las Vegas negli Stati Uniti
- Figura 2.5.1 Schema illustrativo della classificazione dei due livelli termici
- Figura 2.5.2 Schema delle scale del clima urbano,cala locale
- Figura 2.5.3 Schema delle scale del clima urbano, microscala
- Figura 2.5.1.1 Profilo dell'isola di calore urbana
- Figura 2.7.1 Scala dello stress termico dell'indice PET
- Figura 2.7.2 Scale dello stress termico dell'indice UTCI
- Figura 2.8.1 Livello di concentrazione inquinanti e gli effetti sulla qualità dell'aria
- Figura 3.1.1 Schema di struttura del software ENVI-met
- Figura 3.1.2 Tabella dei valori di albedo delle principali superfici
- Figura 3.2.1 Tabella dei dati climatici del giorno 25/07/2022
- Figura 3.2.2 Tabella dei dati della qualità dell'aria del giorno 11/10/2022
- Figura 3.3.1 Tabella passaggi orari nel periodo di picco
- Figura 3.3.2 Punti di rilevamento dati passaggi veicoli a motore e ampiezza flussi

Figura 3.3.3 Punto di rilevamento a - incrocio C.so Duca degli Abruzzi e C.so Luigi Einaudi
 Figura 3.3.4 Punto di rilevamento b - ingresso su C.so Duca degli Abruzzi
 Figura 3.3.5 Punto di rilevamento c - C.so Castelfidardo fonte: Google Maps
 Figura 3.3.6 Punto di rilevamento d - C.so Castelfidardo fonte: Google Maps
 Figura 3.3.7 Punto di rilevamento e - via Paolo Borsellino
 Figura 3.3.8 Punto di rilevamento f - incrocio via Fratelli bandiera e Via Pier Carlo Boggio
 Figura 3.3.9 Punto di rilevamento g - incrocio C.so Francesco Ferrucci e C.so Peschiera
 Figura 3.3.10 Punto di rilevamento h - C.so Peschiera
 Figura 3.3.11 Punto di rilevamento i - incrocio C.so Peschiera e C.so Mediterraneo
 Figura 3.3.12 Punto di rilevamento l - C.so Luigi Einaudi
 Figura 3.4.1 Tabella passaggi giornalieri veicoli
 Figura 3.4.2 Impostazioni geografiche e delle geometrie del modello
 Figura 3.4.3 Modello dell'area estratto da Space
 Figura 3.5.1 Modello dell'area di masterplan estratto da Space
 Figura 4.1.0 Pianta della città di Torino e l'area attorno del Politecnico
 Figura 4.1.1 Dettaglio della planimetria della città di Torino
 Figura 4.1.2 Immagine del raddoppio del Politecnico
 Figura 4.1.3 Immagine del primo cortile sede centrale su C.so Duca degli Abruzzi
 Figura 4.2.1 Immagine del vecchio stadio comunale presente sull'attuale sedime del Politecnico
 Figura 4.2.2 Immagine del cantiere dell'università, anni '30 del '900
 Figura 4.2.3 Cortile principale e aula magna della sede centrale
 Figura 4.2.4 Immagine del parcheggio adiacente alle aule P
 Figura 4.2.5 Assonometria dello stato di fatto
 Figura 4.2.6 Assonometria del masterplan di progetto
 Figura 4.3.1 Anomalia della temperatura massima (in rosso) e minima (in blu) annuale a Torino dal 1951 al 2019
 Figura 4.3.2 Andamento dell'anomalia annuale di temperatura media calcolata rispetto alla temperatura annuale media sul periodo 1989-2020
 Figura 4.3.3 Andamento annuale (percentuali di giorni l'anno) per gli indicatori che nel testo sono descritti come giorni freddi (frost days, FD), notti calde (tropical nights, TR) e giorni molto caldi (summer days, SU)
 Figura 4.3.1.1 le parti del territorio della città di Torino e i rischi rispetto alle isole di calore
 Figura 4.3.1.2 Immagine di uno dei parcheggi a raso della Cittadella
 Figura 4.4.1 Rapporto di copertura superficie fondiaria stato di fatto
 Figura 4.4.2 Le morfologie del costruito
 Figura 4.4.3 Assonometria demolito/costruito
 Figura 4.4.4 Assonometria completa dello stato di fatto del Politecnico
 Figura 4.4.5 Planimetria dello stato di fatto del Politecnico
 Figura 4.4.1.1 Assonometria completa dello stato di fatto del Politecnico, qualità degli spazi esterni
 Figura 4.4.1.2 Planimetria dello stato di fatto del Politecnico, vuoti
 Figura 4.4.1.3 Suddivisione superfici outdoor - permeabili/impermeabili
 Figura 4.4.1.4 Percentuale spazi outdoor attrezzati
 Figura 4.4.1.5 Suddivisione superfici permeabili
 Figura 4.4.1.6 Estensione superficie dedicata a parcheggio
 Figura 4.4.1.7 Estensione tetti verdi
 Figura 4.4.1.8 Disponibilità spazi verdi per studente
 Figura 4.5.1 Suddivisione della vegetazione tra Cittadella e sede centrale
 Figura 4.5.2 Percentuali alberi sopra i 10 metri
 Figura 4.5.3 Rapporto Studenti/alberi

Figura 4.5.4 Immagine delle aule e laboratori corte su C.so Castelfidardo della sede centrale
 Figura 4.5.5 Immagine del tetto verde delle aule I, Cittadella
 Figura 4.5.6 Parcheggio dietro le nuove aule R, Cittadella
 Figura 4.5.7 Cortile e aule del "muro di vetro", sede centrale
 Figura 4.6.1 Indice di copertura Masterplan di ateneo
 Figura 4.6.2 Assonometria completa del masterplan di progetto del Politecnico
 Figura 4.6.3 Planimetria del masterplan di progetto del Politecnico, vuoti
 Figura 4.6.4 Planimetria del masterplan di progetto del Politecnico, pieni
 Figura 4.6.1.1 Suddivisione superfici outdoor - permeabili/impermeabili
 Figura 4.6.1.2 Percentuale spazi outdoor attrezzati
 Figura 4.6.1.3 Percentuale spazi outdoor attrezzati
 Figura 4.6.1.4 Estensione superficie dedicata a parcheggio
 Figura 4.6.1.5 Disponibilità spazi verdi per studente
 Figura 4.6.1.6 Rapporto Studenti/alberi
 Figura 4.6.1.7 Immagine del parcheggio multipiano e i lavori della fossa del parcheggio interrato
 Figura 4.6.1.8 Immagine delle aule M e N e il cantiere del parcheggio interrato e la casa del Welfare
 Figura 5.2.1 Assonometria stato di fatto/temperatura dell'aria ore 15
 Figura 5.2.2 Assonometria masterplan/temperatura dell'aria ore 15
 Figura 5.2.3 Assonometria stato di fatto/temperatura dell'aria ore 10
 Figura 5.2.4 Assonometria stato di fatto/temperatura dell'aria ore 12
 Figura 5.2.5 Assonometria masterplan/temperatura dell'aria ore 10
 Figura 5.2.6 Assonometria masterplan/temperatura dell'aria ore 12
 Figura 5.3.1 Assonometria stato di fatto/temperatura superficiale ore 15
 Figura 5.3.2 Assonometria masterplan/temperatura superficiale ore 15
 Figura 5.3.3 Assonometria stato di fatto/temperatura superficiale ore 10
 Figura 5.3.4 Assonometria stato di fatto/temperatura superficiale ore 12
 Figura 5.3.5 Assonometria masterplan/temperatura superficiale ore 10
 Figura 5.3.6 Assonometria masterplan/temperatura superficiale ore 12
 Figura 5.4.1 Assonometria stato di fatto/direzione del vento ore 15
 Figura 5.4.2 Assonometria masterplan/direzione del vento ore 15
 Figura 5.4.3 Assonometria stato di fatto/direzione del vento ore 10
 Figura 5.4.4 Assonometria stato di fatto/direzione del vento ore 12
 Figura 5.4.5 Assonometria masterplan/direzione del vento ore 10
 Figura 5.4.6 Assonometria masterplan/direzione del vento ore 12
 Figura 5.5.1 Assonometria stato di fatto/PET ore 15
 Figura 5.5.2 Assonometria masterplan/PET ore 15
 Figura 5.5.3 Assonometria stato di fatto/PET ore 10
 Figura 5.5.4 Assonometria stato di fatto/PET ore 12
 Figura 5.5.5 Assonometria masterplan/PET ore 10
 Figura 5.5.6 Assonometria masterplan/PET ore 12
 Figura 5.6.1 Assonometria stato di fatto/particolato atmosferico ore 12
 Figura 5.6.2 Assonometria stato di fatto/particolato atmosferico ore 15
 Figura 5.6.3 Assonometria masterplan/particolato atmosferico ore 12
 Figura 5.6.4 Assonometria masterplan/particolato atmosferico ore 15
 Figura 5.7.1 Differenza assoluta dei valori di PET pre e post masterplan ore 15
 Figura 5.7.2 Differenza assoluta dei valori di temperatura superficiale ore 15
 Figura 5.8.1 Assonometria con punti di controllo

Figura 6.3.1 Nbs materiali riflettenti a bassa albedo. Fonte: Felixx catalogue
Figura 6.3.2 NbS, bio-retention Fonte: Felixx catalogue
Figura 6.3.3 NbS, urban forest Fonte: Felixx catalogue
Figura 6.3.4 NbS, urban corridor. Fonte: Felixx catalogue
Figura 6.3.5 NbS, urban farm. Fonte: Felixx catalogue
Figura 6.3.6 NbS, green roof and green facade. Fonte: Felixx catalogue
Figura 6.4.1 Assonometria masterplan/PET ore 15
Figura 6.4.2 Nature based solution applicate al Politecnico
Figura 6.4.3 NbS Caso 1 - assonometria dell'intervento
Figura 6.4.4 Immagine evocativa dell'intervento del caso 1
Figura 6.4.5 NbS Caso 2 - assonometria dell'intervento
Figura 6.4.6 Immagine evocativa dell'intervento del caso 2
Figura 6.4.7 NbS Caso 3 - assonometria dell'intervento
Figura 6.4.7 - Immagine evocativa dell'intervento del caso 3 Riferimento architettonico: Karen Blixens Plads, Copenhagen, 2019 COBE - Architecture
Figura 6.4.8 - NbS Caso 4 - assonometria dell'intervento
Figura 6.4.9 - Immagine evocativa dell'intervento del caso 4

/01

**ADATTAMENTO
CLIMATICO E
MITIGAZIONE DEL
MICROCLIMA**

0.0 CLIMATE CHANGE

«La temperatura media globale è stata interessata da un aumento di circa 1,2 °C»

La temperatura media globale è stata interessata, dalla metà dell'Ottocento ad oggi, da un **aumento di circa 1,2 °C** (IPCC, 2022).

Per capire la gravità del fenomeno che tutti noi conosciamo come riscaldamento globale e che si cela dietro questa cifra apparentemente minima, è sufficiente confrontare i dati delle temperature medie con quelli relativi ai secoli precedenti (ESA, 2023). Ne emerge l'evidenza che le concentrazioni della maggior parte dei gas serra hanno subito un incremento significativo negli ultimi anni (Chaudhary et al, 2011). La concentrazione di anidride carbonica nell'atmosfera è aumentata di almeno un terzo a partire dal 1750, crescita attribuibile in buona parte alla combustione di carburanti fossili e alle modifiche apportate all'utilizzo della terra, come il disboscamento (JRC Report, 2021). Gli studi effettuati sull'aria intrappolata nei nuclei di ghiaccio dell'Antartico indicano che il livello attuale è certamente il più alto mai riscontrato almeno negli ultimi 420.000 anni e molto probabilmente negli ultimi 20 milioni di anni (Losasso et al.,

2020). Le prime misurazioni della temperatura iniziarono nel 1880, mentre è possibile farsi un'idea di quelle dei secoli precedenti solamente grazie a valori stimati, da elementi naturali come alberi, rocce o ghiacciai (JRC Report, 2021). Guardando l'andamento delle temperature medie¹ è facile vedere come siamo passati da variazioni nell'ordine dei decimi di grado, che hanno seguito negli ultimi millenni, a valori dieci volte maggiori in poco più degli ultimi cento anni (Graham, 2016).

Questo perché l'andamento "oscillatorio" delle temperature è stato sostituito, nel secolo scorso, da una tendenza anormale ed esponenziale, che ha portato ad un surriscaldamento progressivo e sempre più veloce. Basti pensare, a questo proposito, che le temperature globali dal 1880 ad oggi sono aumentate con un tasso medio di circa 0,1 °C per decennio, mentre dagli anni Ottanta del secolo scorso ogni decennio è stato più caldo del precedente e il più caldo mai registrato, con varia-

1. Il grafico dell'andamento delle temperature medie, ogni barra rappresenta la temperatura media di un singolo anno, relativa alla temperatura media dell'intero periodo. Fonte: <https://www.reading.ac.uk/planet/climate-resources>

zioni nell'ordine di quasi due decimi di grado per decennio (University of Reading-UK, 2022).

Le conseguenze di questo riscaldamento globale sono, ad oggi, già visibili ed impattano l'intero pianeta. (JRC Report, 2021). Fenomeni come lo scioglimento dei ghiacciai, l'innalzamento del livello del mare e l'acidificazione degli oceani, sono solo alcune delle conseguenze dell'aumento delle temperature e dei cambiamenti climatici (Druckman et al., 2019). Guardando alle cause che hanno portato, negli ultimi cento anni, a sconvolgere il naturale andamento è chiaro che l'azione umana ha svolto un ruolo fondamentale (Losasso et al., 2020). Dalla fine dell'Ottocento, con la rivoluzione industriale ed il conseguente avvento di nuove tecnologie come il motore a combustione interna, l'umanità cominciò a generare gas inquinanti, ignara che questi avrebbero provocato effetti negativi sul clima. Non è un caso che questo recente periodo storico sia stato definito, anche se non ufficialmente, come **Antropocene**, ovvero l'epoca in cui la specie umana ha iniziato ad

influenzare in modo significativo l'equilibrio del pianeta (IPCC, 2019). Una vasta letteratura scientifica ha affrontato il tema del cambiamento climatico, analizzandone le cause e le conseguenze, nella costante ricerca di modi per contrastare i loro effetti. Tuttavia, data la portata di questo fenomeno ed il grado in cui ha già influenzato l'equilibrio ambientale del pianeta, si può dire che il cambiamento climatico sia da risolvere e fronteggiare nonostante l'oggettiva irreversibilità di alcuni cambiamenti (Adedeji et al., 2014). Parlare di cambiamento climatico non significa più solo affrontare una questione tecnica attraverso misure, osservazioni e analisi di dati, per trovare una soluzione al problema, bensì occorre riconoscere che si tratta di un fenomeno intrinsecamente legato a fattori politici, sociali, culturali ed economici delle nostre società e che, in quanto tale, non è reversibile. La sua eliminazione non è più lo scopo, ma piuttosto l'adattamento a questa nuova condizione e la ricerca di modi in cui è possibile mitigarne gli effetti (IPCC, 2019).

Figura 0.0.1 Una barca sul fondo di un ex lago prosciugato in Turchia.
Fonte:<https://www.gettyimages.it/detail/foto/aerial-view-of-a-fishing-boat-on-a-drought-dry-immagine-royalty-free/1350469075?adp-popup=true>

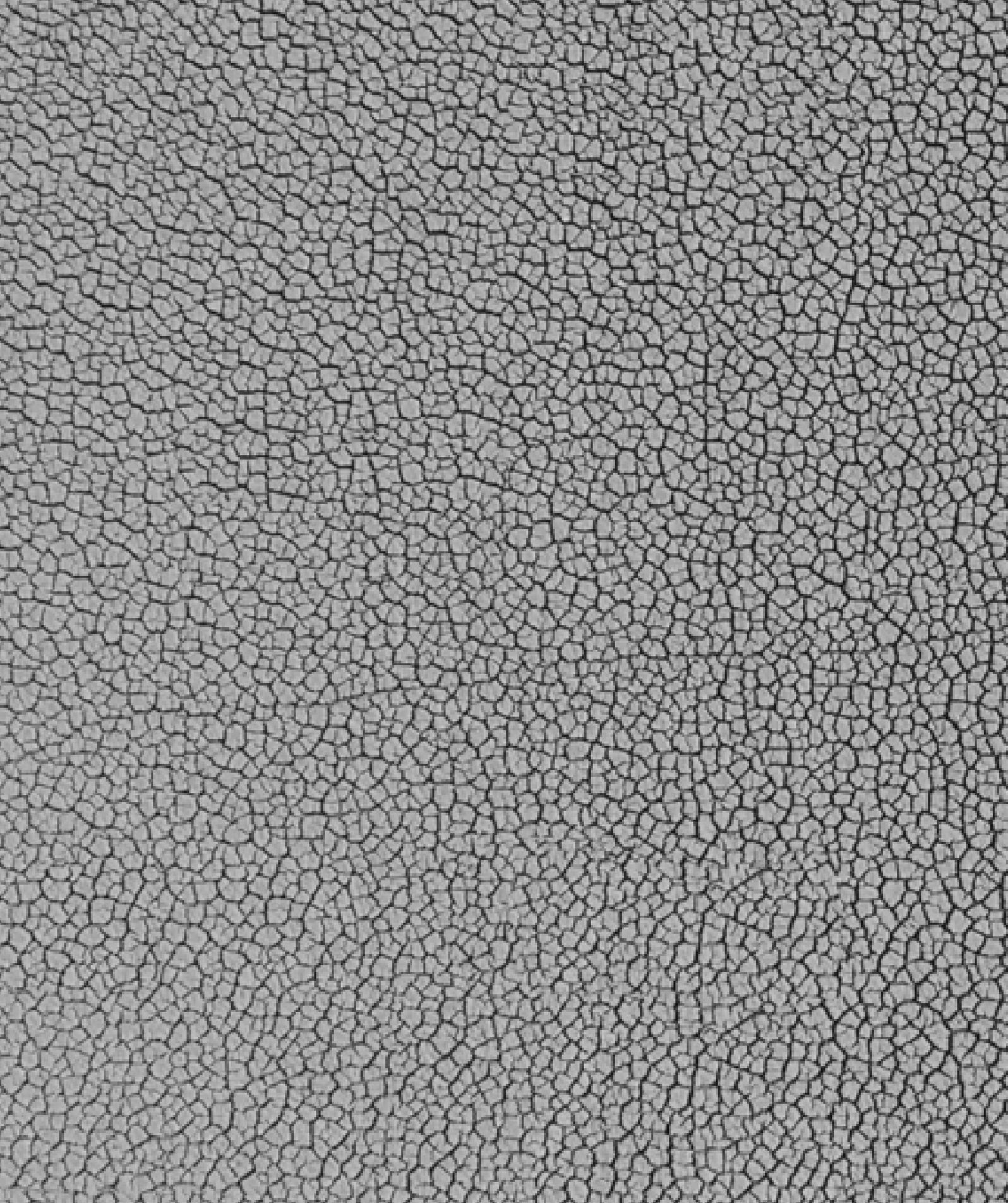




Figura 0.01

1.1 ADATTARSI AL CLIMA CHE CAMBIA

«L'emissione continua di gas effetto serra ha reso oggi la terra di 1,2 °C più calda rispetto la fine del XIX secolo»

L'adattamento è definito, nei sistemi umani o naturali, come il processo di adeguamento al clima attuale o previsto e ai suoi effetti per moderarne i danni o sfruttarne le eventuali opportunità (ISPRA, 2022). A tal proposito l'intervento umano è essenziale per rendere l'ambiente costruito resiliente ai cambiamenti climatici e la pianificazione dell'adattamento nei sistemi umani comporta generalmente un processo di gestione iterativa del rischio (IPCC, 2022)¹.

La variabilità del clima è prodotta sia da cause naturali sia da fattori di natura antropogenica. Infatti, come anticipato, sono proprio le attività umane, a partire dalla rivoluzione industriale del XIX secolo sono state il principale motore del cambiamento climatico (Mercogliano, 2020). I fattori principali legati ai cambiamenti climatici sono: la combustione di carburanti fossili (carbone, petrolio e gas naturale) nei processi produttivi, le emissioni del settore agricolo ma anche la deforestazione e l'edilizia² (Röck et al., 2020). Questi ultimi svolgono un ruolo chiave nel rilascio in atmosfera di grandi

quantità di gas clima alteranti (anidride carbonica CO₂, protossido di azoto N₂O, metano CH₄, ozono O₃, idrofluorocarburi (HFC), perfluorocarburi (PFC), esafluoro di zolfo (SF₆) e nell'influenzare l'aumento della temperatura (Bologna et al, 2021). L'emissione continua di gas effetto serra ha reso oggi la terra di 1,2 °C più calda rispetto la fine del XIX secolo e l'ultimo decennio (2011-2020) è stato il più caldo mai registrato (IPCC, 2022).

Le conseguenze del surriscaldamento del clima comportano un aumento di fenomeni meteorologici e climatici estremi, tra cui incendi, intense siccità, innalzamento del livello del mare, allagamenti, ondate di calore e diminuzione della biodiversità (Mercogliano, 2020). La risposta di adattamento si riflette quindi sulla capacità adattiva ("adaptive capacity") riferita alla capacità di un sistema di regolare le sue caratteristiche o il suo comportamento, al fine di espandere le sue abilità di adattarsi in caso di variabilità climatica esistente o di condizioni climatiche future (Engle, 2011). Il processo di adattamento richiede la capacità di

1. Gruppo intergovernativo sul cambiamento climatico formato nel 1988 da due organismi delle Nazioni Unite, l'Organizzazione meteorologica mondiale e il Programma delle Nazioni Unite.

2. Il settore delle costruzioni e delle costruzioni ha rappresentato il 36% del consumo energetico finale e il 39% delle emissioni di anidride carbonica (CO₂) legate all'energia e ai processi nel 2018.

imparare dalle esperienze precedenti per far fronte al clima attuale e di applicarle alla gestione del clima futuro ed eventi inaspettati (Brooks et al., 2023).

In ambito urbano, la capacità adattiva è l'attitudine a progettare e attuare strategie di adattamento efficaci e di reagire all'evoluzione dei rischi e delle sollecitazioni, in modo da ridurre la probabilità e/o l'entità dei risultati dannosi (Brooks et al., 2014). Bisogna sottolineare che l'adattamento, non sarà trasversale e ubiquitario, ma bensì un fenomeno localizzato (Leone, 2020). Le strategie sono pensate per contesti specifici e per ogni minaccia/avversità ci sono armi diverse con cui difendersi, pertanto non sempre queste soluzioni di adattamento possono essere usate in modo universale. Le azioni intraprese saranno conseguenza delle necessità per le singole comunità di adattarsi alle manifestazioni locali e gli impatti dei cambiamenti climatici, che saranno differenti in base alla posizione geografica e dalle condizioni socioeconomiche e politici locali (Brooks et al., 2014).

Strategie possibili

Le conseguenze sulla popolazione e sugli ecosistemi di questi eventi possono essere classificate come primarie, secondarie e terziarie. I segni primari includono lo stress acuto e cronico delle ondate di calore o i traumi dovuti all'aumento degli incendi e delle inondazioni. I segni secondari, invece, sono indiretti, come l'aumento dei prezzi delle materie prime, alterazione dei raccolti, migrazioni e conflitti e minacce alle infrastrutture delle città. Gli effetti terziari comprendono la perdita di biodiversità, perturbazioni geopolitiche e socioeconomiche e perdite di habitat (Butler et al., 2009). Le strategie di adattamento hanno come obiettivo la limitazione degli effetti climatici secondari al fine di evitare gli effetti terziari. Ciò significa prevenire gli effetti direttamente percepibili dalla comunità, come l'allagamento di una strada. Le strategie di adattamento hanno una tempistica di attuazione quasi immediata ed il campo spaziale di attuazione è pressoché solo locale (dalla scala micro-urbana fino ad una regionale (Pollo, Trane, 2020).

Figura 1.1.1 unità esterne di condizionatori, temperature sempre più alte rendono fondamentale climatizzare gli spazi interni. fonte: <https://scitechdaily.com/cooling-home>

Figura 1.1.2 paratia mobile del MOSE di Venezia, attivato per contrastare il fenomeno dell'acqua alta sempre più aggressivo. fonte: <https://www.repubblica.it/veneto/>



Figura 1.1.1



Figura 1.1.2

1.2 MITIGARE GLI EFFETTI DI UN CLIMA CHE CAMBIA

«per mitigazione è intesa l'azione diretta sulle effettive cause del cambiamento climatico»

1. Le tecnologie di riduzione della radiazione solare (Solar Radiation Management) cercano di contrastare il riscaldamento globale mitigando l'incidenza e l'assorbimento dell'insolazione sulla superficie terrestre, causando un raffreddamento in grado di pareggiare l'effetto dei gas climalteranti. La riduzione dell'insolazione corrisponde a un aumento della radiazione solare riflessa cioè l'albedo terrestre, per cui si parla anche di modifica dell'albedo per questo approccio. Fonte: Pope, Braesicke, Grainger, Stratospheric aerosol particles and solar-radiation management. *Nature*, 2012 <https://doi.org/10.1038/nclimate1528>

La mitigazione dei cambiamenti climatici si riferisce agli sforzi per ridurre o prevenire l'emissione di gas serra. Il concetto di mitigazione ha intrinseca la necessità di cambiare il modo in cui viviamo, ci spostiamo, consumiamo e produciamo (Dowell et al, 2017).

Se per adattamento intendiamo l'adeguamento dei sistemi umani o agli stimoli o ai loro effetti (effettivi o previsti/prevedibili) provenienti dal cambiamento climatico in corso, con l'obiettivo di moderarne i danni o di sfruttarne i benefici, di contro per mitigazione si intende l'azione diretta sulle effettive cause del cambiamento climatico e dunque gli sforzi sono indirizzati a ridurre le emissioni di gas clima alteranti nell'atmosfera (IPCC, 2022).

Le azioni di mitigazione non sono più solamente prerogativa locale, ma devono essere prese quanto più possibile globalmente per far sì che siano efficaci (Lawrence, 2018).

Approcci

Ci sono tre principali approcci di mitigazione del cambiamento climatico. In primo luogo, i sistemi di mi-

tigazione convenzionali utilizzano tecnologie e tecniche di decarbonizzazione che riducono le emissioni di CO₂, come le energie rinnovabili, combustibili meno inquinanti, maggiore efficienza, energia nucleare e stoccaggio di anidride carbonica (Wennersten et al., 2015).

Un secondo approccio riguarda la cattura della CO₂ dall'atmosfera e sono definite tecnologie a emissioni negative (Dowell et al, 2017). La cattura e l'utilizzo del carbonio si riferisce a una gamma di applicazioni attraverso le quali la CO₂ viene catturata e impiegata direttamente nei processi industriali (non alterata chimicamente) o indirettamente (cioè trasformata) in vari prodotti (International Energy Agency, 2023). Le principali strategie di emissione negativa spaziano dallo stoccaggio di carbonio attraverso impianti industriali, alla densificazione delle foreste e costruzione o ripristino di paludi (IEA, 2023). Infine, un terzo percorso ruota attorno all'idea di alterare l'equilibrio di radiazione della terra¹ attraverso la gestione della radiazione solare e terrestre. (Ricke,

2017). L'obiettivo principale è la stabilizzazione o la riduzione della temperatura¹. A differenza delle tecnologie a emissioni negative, ciò si ottiene senza alterare le concentrazioni di gas serra nell'atmosfera. Le principali tecniche di geoingegneria radiativa indotta sono ancora in fase di studio teorico e sussistono dubbi su un'implementazione pratica su larga scala (Doran, Rooney, 2021).

L'innovazione tecnologica, la salute e il cambiamento climatico sono alcuni dei temi a cui è legata la nozione di mitigazione. Le Nazioni Unite definiscono specificamente il fenomeno della riduzione del riscaldamento globale come "un intervento dell'uomo per ridurre le fonti di gas serra e/o aumentare il loro assorbimento, per diminuire le loro concentrazioni nell'atmosfera" (Lawrence, 2018).

La capacità del "sistema" di affrontare adeguatamente le difficoltà del riscaldamento globale è rappresentata dalla mitigazione degli effetti causati dal cambiamento climatico, insieme alla capacità di adattamento intrinseca dalle comunità (Lucarelli et al., 2017).

li et al., 2017).

Mitigare

La mitigazione consiste nel rendere meno gravi gli impatti del cambiamento climatico prevenendo o riducendo l'emissione di gas serra (GHG) nell'atmosfera. Ciò si ottiene dunque riducendo le fonti di questi gas ovvero aumentando la quota di energie rinnovabili, creando un sistema di mobilità più pulito o migliorando lo stoccaggio di questi gas aumentando le dimensioni delle foreste (Lucarelli et al., 2017).

L'obiettivo della mitigazione è limitare le interferenze umane con il clima terrestre, "stabilizzare i livelli di gas serra in un lasso di tempo sufficiente per consentire agli ecosistemi di adattarsi naturalmente ai cambiamenti climatici, garantire che le attività umane e lo sviluppo economico non siano minacciati" (NASA Report, 2023).

«L'obiettivo della mitigazione è limitare le interferenze umane con il clima terrestre»

Figura 1.2.1 Solar farm nel Regno Unito. <https://www.edf-re.uk/>

Figura 1.2.2 parco eolico off shore nel mare del Nord. fonte: <https://www.repubblica.it/green-and-blue/2020/>





**L'ADATTAMENTO È
L'INSIEME DELLE STRATEGIE
E LE AZIONI ADOTTATE PER
RIDURRE LA VULNERABILITÀ
E MIGLIORARE LA CAPACITÀ
DI RESISTENZA DEI SISTEMI
NATURALI E UMANI DI FRONTE
AGLI EFFETTI NEGATIVI DEL
CAMBIAMENTO CLIMATICO.**

**LA MITIGAZIONE È
L'INSIEME DI AZIONI VOLTE
A RIDURRE LE EMISSIONI DI
GAS A EFFETTO SERRA O A
RIMUOVERLE DALL'ATMOSFERA,
AL FINE DI LIMITARE L'AUMENTO
DELLA TEMPERATURA GLOBALE
E I SUOI EFFETTI NEGATIVI SUL
CLIMA E SULL'AMBIENTE.**

1.3 L'AGENDA 2030 E CLIMATE ACTION

L'Agenda

Nel Rapporto della Commissione Brundtland del 1987, lo sviluppo sostenibile è stato definito come "lo sviluppo che soddisfa i bisogni del presente senza compromettere la capacità delle generazioni future di soddisfare i propri bisogni" (Brundtland Report, 1987). I tre pilastri della teoria della sostenibilità, riconosciuti dal Rapporto, riconoscono che la sostenibilità richiede un approccio equilibrato e integrato che consideri gli aspetti ambientali, sociali ed economici. Affrontando simultaneamente le dimensioni ambientali, sociali ed economiche, l'obiettivo è raggiungere uno sviluppo sostenibile che soddisfi le esigenze del presente senza compromettere la capacità delle generazioni future di soddisfare i propri bisogni (CNR, 2021).

Queste basi hanno portato alla definizione della "2030 Agenda for Sustainable Development", adottata da tutti gli Stati membri delle Nazioni Unite nel 2015 ed entrata in vigore il 1° gennaio 2016 (Weiland et al., 2021). Si tratta di un documento che stabilisce un piano

comune per la pace e la prosperità sia per le persone che per il pianeta, nel presente e nel futuro. Il cuore del documento sono i **17 Obiettivi di Sviluppo Sostenibile con 169 targets e 231 indicators** che rappresentano un'agenda politica universale destinata a guidare le decisioni prese nei successivi 15 anni (<https://sdgs.un.org/2030agenda>). L'Agenda 2030 è stata concepita con un protocollo completo di follow-up e revisione, poiché le Nazioni Unite (ONU) hanno riconosciuto che il monitoraggio dei progressi "solido, volontario, efficace, partecipativo, trasparente e integrato" a livello globale, regionale e nazionale, contribuisce in modo vitale all'attuazione degli SDGs (Lee et al., 2016). Di conseguenza, un monitoraggio solido ed una rendicontazione sistematica sono fondamentali per raggiungerli, intraprendere azioni guidate da dati e statistiche e infine intervenire sulle lacune politiche da colmare (Anderson et al., 2017). La ricerca scientifica a sostegno della definizione delle politiche svolge un ruolo fondamentale in questo. In effetti, la ricerca ha forn-

to dati e approcci per valutare i progressi su scala globale, regionale, nazionale e subnazionale, oltre a sviluppare metodi per l'analisi delle interconnessioni tra gli SDG (Anderson et al., 2017).

La promessa centrale dell'agenda 2030 è "Leave no one behind" e rappresenta l'impegno inequivocabile di tutti gli Stati membri delle Nazioni Unite di attuare sforzi universali, un'integrazione sistemica dei pilastri sociali, ambientali ed economici dello sviluppo sostenibile e la promozione di un mondo basato sulle cinque P (People, Planet, Prosperity, Peace, e Partnership) (Trane et al., 2023).

Obiettivo

Il cambiamento deve essere completo e includere tutti gli obiettivi e i traguardi dell'agenda, perché tutti sono interconnessi e indivisibili e non possono essere affrontati separatamente, ma piuttosto attraverso le loro interconnessioni e interazioni (Global Sustainable Development Report, 2019).

Anche se gli SDGs non sono giuridicamente vincolanti, hanno creato

un quadro di riferimento che gli stati membri possono utilizzare per raggiungere la sostenibilità. Tuttavia, rimangono molte sfide nella localizzazione completa degli SDG, principalmente a causa della mancanza di dati e della necessità di "convertire" obiettivi fissati a livello nazionale o sovranazionale in obiettivi misurabili a livello urbano (Trane et al., 2023).

Ad oggi

Le Nazioni Unite sono state il principale catalizzatore per la cooperazione internazionale sulle tematiche legate allo sviluppo sostenibile per molti anni. Assieme all'accordo di Parigi¹ e l'accordo di Sendai² gli SDGs, sono particolarmente importanti per la definizione delle politiche dell'era post-2015 (Chan et al., 2019).

Ad oggi, però, la chiusura della COP27 di Sharm el-Sheikh³ (Fisher, 2022), ha portato con sé la consapevolezza di quanto sia difficile mantenere gli obiettivi promessi al debutto dell'agenda (Meijers et al., 2004).

Gli sforzi per limitare il riscaldamento

1. L'Accordo di Parigi è un trattato internazionale adottato nel 2015 nell'ambito della Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (UNFCCC). Mira a combattere i cambiamenti climatici limitando il riscaldamento globale a ben meno di 2 gradi Celsius rispetto ai livelli preindustriali e proseguendo gli sforzi per limitare l'aumento della temperatura a 1,5 gradi Celsius. Fonte: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>

2. Il Quadro di Sendai per la riduzione del rischio di catastrofi è un accordo globale adottato nel 2015 in occasione della Terza Conferenza mondiale delle Nazioni Unite sulla riduzione del rischio di catastrofi tenutasi a Sendai, in Giappone. Si tratta di un piano della durata di 15 anni (2015-2030) che definisce le linee guida e le priorità internazionali per ridurre il rischio di catastrofi e costruire la resilienza ai disastri. Fonte: <https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030>



Figura 1.3.4

to globale di **1,5°C** rispetto ai livelli preindustriali si sono dimostrati non sufficienti (King, 2023). L'inefficacia delle azioni di mitigazione attuate fino ad ora rendono quindi l'esigenza di azioni di adattamento ancora più urgenti (European Environment Agency Report, 2022).

L'agenda, l'adattamento e la mitigazione

Se gli SDGs dell'Agenda forniscono una visione globale per un futuro sostenibile e ambiscono ad affrontare le sfide più urgenti che l'umanità deve affrontare, i **target** sono invece gli specifici risultati o traguardi collegati agli obiettivi di sviluppo sostenibile. Ogni SDG ha un insieme di target associati, che rappresentano le sfide specifiche che devono essere affrontate per raggiungere tale obiettivo. Infine, gli **indicatori** sono gli strumenti utilizzati per misurare e valutare i progressi compiuti verso il raggiungimento degli SDGs. Sono misure specifiche che consentono di monitorare e quantificare i risultati ed il loro perfezionamento

nel tempo (Lee et al., 2018). Sebbene il cambiamento climatico non sia esplicitamente menzionato come obiettivo a sé stante, è strettamente interconnesso con diversi obiettivi ed i loro targets all'interno dell'Agenda. L'adattamento e la mitigazione del clima sono però componenti integrali dell'Agenda 2030 e gli sforzi per affrontare il cambiamento climatico si riflettono di conseguenza in essa. L'adattamento e la mitigazione sono quindi incorporati nella tabella di marcia dell'ONU e, nello specifico, in alcuni SDGs che vengono discussi di seguito (Trane et al., 2023).

Obiettivo 7: energia pulita e accessibile: questo obiettivo promuove l'uso di fonti energetiche pulite e rinnovabili, come l'energia solare ed eolica, per mitigare le emissioni di gas serra e ridurre la dipendenza dai combustibili fossili (Filho et al., 2022).

Obiettivo 9: Industria, innovazione e infrastrutture: questo obiettivo evidenzia l'importanza dello sviluppo di infrastrutture sostenibili e dell'innovazione tecnologica per supportare l'adattamento e la mi-

3. È la conferenza delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici del 2022, conosciuta anche come COP27, è stata la XXVII Conferenza delle Parti della Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici e si è tenuta a Sharm el-Sheikh, sotto la presidenza dell'Egitto, dal 6 al 20 novembre 2022.

tigazione del clima (Denoncourt, 2019).

Obiettivo 11: Città e comunità sostenibili: questo obiettivo si concentra sul rendere le città e gli insediamenti umani inclusivi, sicuri, resilienti e sostenibili (Filho et al., 2022).

Obiettivo 12: Consumo e produzione responsabili: questo obiettivo promuove modelli di consumo e produzione sostenibili, che includono la riduzione al minimo dei rifiuti, la riduzione dell'impronta di carbonio e l'adozione di pratiche sostenibili in tutti i settori (sdgs.un.org., 2022).

Obiettivo 13: azione per il clima, si concentra esplicitamente sulla lotta al cambiamento climatico e ai suoi impatti chiedendo un'azione urgente per mitigare le emissioni di gas a effetto serra, rafforzare la resilienza e la capacità di adattamento e mobilitare finanziamenti per iniziative legate al clima (King, 2023).

Obiettivo 14 e 15: Vita sott'acqua e Vita sulla terra: questi obiettivi affrontano la conservazione e l'uso sostenibile degli ecosistemi marini e terrestri, che sono fondamentali per l'adattamento e la mitigazione del

clima (Filho et al., 2022).

Tuttavia, gli obiettivi con un più diretto collegamento al microclima e le sue strategie di adattamento e mitigazione sono il Goal 11, il Goal 13 e il Goal 3.

Questi SDGs hanno molteplici target relativi allo sviluppo urbano, al benessere degli esseri umani ed alle azioni di salvaguardia del pianeta (Soergel et al., 2021).

L'Agenda, il microclima e il comfort ambientale

Vengono di seguito riportati i riferimenti degli SDGs legati alla climate action, al benessere degli esseri umani e i rispettivi target associati.

SDG 3

L'Obiettivo di Sviluppo Sostenibile 3 (SDG 3, Figura 1.3.1) si concentra sulla garanzia di una vita sana e sulla promozione del benessere per tutti rivolgendosi principalmente a questioni sanitarie chiave come la riduzione della mortalità, la lotta alle malattie infettive e l'agevolazio-

ne all'accesso ai servizi sanitari essenziali (Macdiarmid et al., 2019). Sebbene l'SDG 3 non affronti esplicitamente il cambiamento climatico, esiste un legame intrinseco tra i due in quanto gli effetti del cambiamento climatico possono avere un impatto significativo sulla salute e sul benessere umano (Eda-Conferderazione Svizzera, 2023). Le principali connessioni emerse tra l'SDG 3 e il cambiamento climatico sono riportate di seguito.

Target 3.9: ha l'intenzione di ridurre sostanzialmente il numero di morti e malattie dovute a sostanze chimiche pericolose, inquinamento e contaminazione dell'aria, dell'acqua e del suolo entro il 2030. I cambiamenti climatici contribuiscono, infatti, indirettamente a manifestazioni dannose per la salute. (sdgs.un.org, 2023).

Target 3.b: sostiene la ricerca e lo sviluppo di vaccini e medicinali per le malattie trasmissibili e non trasmissibili che colpiscono principalmente i paesi in via di sviluppo e fornisce accesso a medicinali e vaccini essenziali a prezzi accessibili (Nerini et al., 2019).

Target 3.d: rafforza la capacità di tutti i paesi di gestire le situazioni di emergenza, riducendo i rischi sanitari nazionali e globali e migliorandone la gestione. Il cambiamento climatico può aumentare la frequenza e l'intensità degli eventi meteorologici estremi, che possono comportare rischi per la salute (sdgs.un.org, 2023).

Target 3.e: si pone di aumentare il finanziamento della sanità e il reclutamento, lo sviluppo, la formazione e il mantenimento del personale sanitario nei paesi in via di sviluppo e nei piccoli stati insulari (sdgs.un.org, 2023).

Sebbene questi target si concentrino principalmente sugli esiti sanitari, indirettamente riconoscono il potenziale impatto del cambiamento climatico sulla salute umana (Nerini et al., 2019).

SDG 13

L'Obiettivo di Sviluppo Sostenibile 13 (SDG 13, Figura 1.3.3) affronta specificamente, attraverso i suoi target, l'azione per il clima e la necessità di combattere il cambiamento climatico. Si concentra sull'adozio-

ne di misure urgenti per mitigare gli impatti dei cambiamenti climatici e costruire la resilienza ai suoi effetti, come la riduzione delle emissioni di gas serra attraverso la promozione dell'energia (sdgs.un.org, 2023).

Per la gestione efficace degli impatti dei cambiamenti climatici si impegna a migliorare la capacità di adattamento, l'attuazione di strategie di resilienza e l'integrazione delle considerazioni sui cambiamenti climatici nelle politiche e nei processi di pianificazione (Mortimer et al., 2023).

Le connessioni con il cambiamento climatico sono specificate da alcuni suoi targets, tra cui (Mortimer et al., 2023):

Target 13.1: che si impegna a rafforzare la resilienza e la capacità di adattamento ai pericoli legati al clima e ai disastri naturali sottolineando la necessità di migliorare la capacità dei paesi e delle comunità di resistere e affrontare eventi estremi come tempeste, inondazioni e siccità (Filho et al., 2023).

Target 13.2: integra, invece, le misure relative al cambiamento climatico nelle politiche e nelle

strategie nazionali evidenziando l'importanza di incorporare le considerazioni relative al cambiamento climatico nelle politiche nazionali e nei processi di pianificazione (Mortimer et al., 2023).

Target 13.3: ha il focus di migliorare l'istruzione, la sensibilizzazione e le capacità di gestione degli effetti avversi del climate change e di ridurre il loro impatto implementando i sistemi di preallarme.

Target 13.a: sottolinea l'impegno assunto dai paesi sviluppati per l'obiettivo di mobilitare 100 miliardi di dollari all'anno di finanziamenti per il clima entro il 2030 affrontando l'aspetto finanziario dell'azione contro il cambiamento climatico (Mortimer et al., 2023).

Target 13.b: Promuove meccanismi per aumentare la capacità di pianificazione e gestione del cambiamento climatico nei paesi meno sviluppati e nei piccoli stati insulari. Sottolinea appunto, la necessità di migliorare la loro capacità di pianificare e gestire il cambiamento climatico (Mortimer et al., 2023).

SDG 11

L'obiettivo di sviluppo sostenibile 11 (SDG 11, Figura 1.3.2) si concentra sul rendere le città e gli insediamenti inclusivi, sicuri, resilienti e sostenibili. Attraverso i seguenti Targets SDG 11 tocca i temi del cambiamento climatico e del microclima (Kandpal et al., 2023):

Target 11.2: si impegna di fornire a tutti l'accesso a sistemi di trasporto sicuri, convenienti, accessibili e sostenibili entro il 2030, in particolare, espandendo il trasporto pubblico e riconoscendo l'importanza dei sistemi di trasporto sostenibili, come strumento essenziale per ridurre le emissioni di gas serra del settore dei trasporti (Kandpal et al., 2023).

Target 11.3: mira a migliorare l'urbanizzazione inclusiva e sostenibile e la capacità di pianificazione e gestione partecipativa, integrata e sostenibile degli insediamenti umani in tutti i paesi (Kandpal et al., 2023).

Target 11.5: sottolinea la necessità di ridurre significativamente il numero di decessi e il numero di persone colpite da disastri, riconoscendo l'importanza della riduzione

del rischio di catastrofi e della costruzione della resilienza nelle aree urbane, dove il cambiamento climatico può esacerbare la frequenza e l'intensità dei disastri naturali (Kandpal et al., 2023).

Target 11.7: si focalizza a fornire l'accesso universale a spazi verdi e pubblici sicuri, inclusivi e accessibili, soffermandosi sull'importanza che questi ultimi hanno nelle aree urbane alla mitigazione dei cambiamenti climatici (come la riduzione dell'effetto isola di calore urbano) e al miglioramento della qualità dell'aria (Kandpal et al., 2023).

Target 11.b: Si pone l'obiettivo di aumentare il numero di città e insediamenti umani che adottano ed attuano politiche e piani integrati per l'inclusione, l'efficienza delle risorse, la mitigazione, l'adattamento ai cambiamenti climatici e la resilienza ai disastri (Mortimer et al., 2023).

SDG 11 e microclima

SDG 11 si concentra, come precedentemente affermato, sul rendere le città e gli insediamenti umani inclusivi, sicuri, resilienti e sostenibili. Il microclima si riferisce dunque alle



Figura 1.3.1



Figura 1.3.2



Figura 1.3.3

condizioni climatiche locali all'interno di un'area specifica (le città) che possono variare rispetto al clima regionale (più ampio) a causa di fattori quali la topografia, la vegetazione e l'urbanizzazione (Devisscher et al., 2019). SDG 11 e microclima sono quindi interconnessi sotto vari punti di vista ed il comfort umano e il benessere sono legati alla creazione di un microclima favorevole nelle aree urbane che, a sua volta, contribuisce al benessere e alla qualità della vita dei cittadini (Priya et al., 2021). In sintesi, SDG 11 e microclima sono strettamente intrecciati. Il raggiungimento degli obiettivi dell'SDG 11, come la creazione di città sostenibili e resilienti, il miglioramento delle infrastrutture urbane e la promozione degli spazi verdi, può avere un impatto positivo sul microclima all'interno delle aree urbane. Considerando i fattori microclimatici nella pianificazione e progettazione urbana, le città possono migliorare il comfort umano, riducendo l'effetto isola di calore urbano, mitigando gli impatti dei cambiamenti climatici e promuovendo lo sviluppo sostenibile (Makropoulou, 2017).

Agenda e la qualità del comfort degli spazi outdoor

Questa ricerca ha approfondito il legame tra gli obiettivi dell'Agenda e la qualità del comfort del spazi outdoor, sebbene il termine "microclima" non sia esplicitamente menzionato nell'Agenda 2030, ad uno sguardo più approfondito emergono connessioni con gli SDGs. Come ricordato da Vukmirovic (2019), il potenziale legame tra il comfort degli spazi pubblici esterni e il microclima può essere individuato in cinque SDG (3, 5, 8, 11, 13). In particolare con i target 3.9, 7.1 e 13.1 In una prospettiva più mirata, gli sforzi verso la mitigazione del microclima urbano da parte della riprogettazione dello spazio outdoor possono implicare benefici nel raggiungimento di SDG 7, poiché l'abbassamento delle temperature esterne si trasforma in una riduzione della domanda di energia per gli edifici (Pollo, 2019).

1.3.1 EUROPEAN GREENDEAL E CLIMATE ACTION

Il Green Deal europeo è un piano completo e una tabella di marcia proposto dalla Commissione Europea, il ramo esecutivo dell'Unione europea¹ (UE). Mira a rendere l'UE il primo continente al mondo a impatto climatico zero entro il 2050 e a trasformare l'Europa in una società più sostenibile, inclusiva e prospera. L'impegno da parte di tutti gli stati membri dell'unione è stato preso in seguito alla comunicazione da parte della presidente della Commissione Europea Von der Leyen nel 2019 (<https://commission.europa.eu/>, 2023).

Si tratta di una serie di tappe mirate a raggiungere un'economia pulita e circolare capace di adattarsi ai cambiamenti climatici, limitando al più possibile la perdita di biodiversità e ridurre l'inquinamento (Sikora, 2021). L'accordo delinea gli investimenti necessari, gli strumenti di finanziamento e spiega come garantire una transizione giusta e inclusiva per aiutare coloro che sono più colpiti dal passaggio all'economia verde. Infatti, il Green Deal copre tutti i settori dell'economia, in par-

ticolare i trasporti, l'energia, l'agricoltura, l'edilizia e le industrie (Rivas et al., 2021), oltre che le varie aree politiche e stabilisce obiettivi e azioni ambiziose in diversi settori per affrontare i cambiamenti climatici, proteggere l'ambiente e promuovere la crescita sostenibile. Seguono i suoi obiettivi principali. (<https://commission.europa.eu/>, 2023).

Neutralità climatica: il Green Deal mira a raggiungere la neutralità climatica entro il 2050, il che significa bilanciare le emissioni di gas serra con la loro rimozione dall'atmosfera.

Transizione all'energia pulita: il piano sottolinea la necessità di passare a fonti di energia pulite e rinnovabili, come l'energia eolica, solare ed idroelettrica. Mira, inoltre, ad aumentare la quota di energia rinnovabile nel mix energetico dell'UE e migliorare l'efficienza energetica attraverso varie iniziative e investimenti.

Industria sostenibile ed economia circolare: il Green Deal promuove la transizione verso un'economia più sostenibile e circolare,

«rendere l'UE il primo continente al mondo a impatto climatico zero entro il 2050»

1. Per conseguire gli obiettivi fissati dal Green Deal europeo, la Commissione si è impegnata a mobilitare almeno 1000 miliardi di euro di investimenti sostenibili nel prossimo decennio.

Il 30% del bilancio pluriennale dell'UE (2021-2028) e dello strumento unico dell'UE NextGenerationEU (NGEU) per la ripresa dalla pandemia di COVID-19 è stato destinato agli investimenti verdi.

I paesi dell'UE devono destinare almeno il 37% dei finanziamenti ricevuti nell'ambito del dispositivo per la ripresa e la resilienza da 672,5 miliardi di euro a investimenti e riforme che sostengano gli obiettivi in materia di clima. fonte: <https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/>

in cui le risorse sono utilizzate in modo efficiente, i rifiuti sono ridotti al minimo e i prodotti sono progettati per la durata, la riparabilità e la riciclabilità.

Biodiversità e tutela della natura: si pone l'accento sulla protezione e il ripristino della biodiversità e degli ecosistemi tramite iniziative per fermare la deforestazione, ridurre l'uso di pesticidi e ripristinare gli ecosistemi degradati.

Mobilità e trasporti sostenibili: ha l'obiettivo di promuovere una mobilità pulita e sostenibile investendo in sistemi di trasporto a basse emissioni, promuovendo veicoli elettrici, migliorando i trasporti pubblici e sviluppando carburanti e infrastrutture alternativi e sostenibili.

Strategia Farm to Fork: questa iniziativa si concentra sul rendere il sistema alimentare più sostenibile, sano e resiliente promuovendo pratiche agricole sostenibili, riducendo l'uso di pesticidi e antibiotici e migliorando il benessere degli animali.

Fair Transition: sottolinea la necessità di una transizione giusta e inclusiva verso un'economia sosteni-

bile garantendo che nessuno venga lasciato indietro.

Adattamento

Una delle principali azioni legate al Green Deal è il miglioramento "degli sforzi per resistere ai cambiamenti climatici e sviluppare la resilienza e la prevenzione" (European Commission, 2019), in particolare attraverso strategie di pianificazione settoriali e processi decisionali adattativi al clima. «Ciò presuppone un rinnovato approccio alla pianificazione e alla progettazione edilizia e urbana, privilegiando un'azione pro-attiva attraverso politiche per la preparazione sociale e progetti per l'adattamento fisico che superino la fase emergenziale post-evento al fine di ridurre al minimo il potenziale degli impatti del cambiamento climatico.» (D'Ambrosio, 2020).

Il principale quadro di riferimento dell'UE per l'adattamento è la "**EU Strategy on Adaptation to Climate Change**" della Commissione europea, adottata per la prima volta nel 2013 e rivista nel 2021. La strategia fornisce le linee guida per l'adattamento agli impatti dei cambiamenti climatici e mira a

migliorare la resilienza dell'Europa e la preparazione ad affrontare gli eventi futuri (Rivas et al., 2021).

La strategia dell'UE sull'adattamento ai cambiamenti climatici si concentra sui seguenti obiettivi chiave (European Commission, 2021):

Promuovere l'azione: vengono incoraggiati gli Stati membri dell'UE a sviluppare e attuare strategie e piani nazionali di adattamento promuovendo la collaborazione, la condivisione delle conoscenze e lo scambio delle best practises tra gli Stati membri.

Integrazione dell'adattamento: punta ad integrare le considerazioni sull'adattamento climatico in vari settori socio-economici, tra cui l'agricoltura, la gestione delle risorse idriche, la gestione delle aree costiere, la salute, le infrastrutture e la biodiversità.

Condivisione delle conoscenze: l'UE si pone l'obiettivo di facilitare la condivisione dei dati sugli impatti climatici supportando le attività di ricerca, monitoraggio e valutazione per migliorare la comprensione degli impatti dei cambiamenti climatici e le opzioni di adattamento.

Aumentare la resilienza: questa strategia mira ad incrementare la resilienza degli Stati membri dell'UE agli impatti dei cambiamenti climatici con misure come il miglioramento della gestione del rischio di catastrofi, il potenziamento dei sistemi di allerta precoce e lo sviluppo di nuove infrastrutture di contrasto.

Coordinamento a livello dell'UE: incoraggia la collaborazione tra la Commissione europea, gli Stati membri, le autorità regionali e le parti interessate per scambiare conoscenze, sviluppare metodologie comuni e condividere dati sugli impatti e le vulnerabilità del clima.

Monitoraggio: l'UE stabilisce meccanismi per monitorare e riferire sui progressi e sull'efficacia dell'adattamento grazie all'uso di indicatori ed alla raccolta di dati per valutare l'attuazione delle misure di adattamento.

Mitigazione

Per guidare il processo di mitigazione l'Unione europea ha attuato, invece, varie iniziative e politiche concepite per contribuire agli obiettivi climatici dell'UE, compreso il

raggiungimento della neutralità climatica entro il 2050, quali:

Effort Sharing Regulation: stabilisce gli obiettivi vincolanti di riduzione delle emissioni per i settori non coperti dall'EU ETS (Emission Trading Scheme)², come i trasporti, gli edifici, l'agricoltura e i rifiuti.

Renewable Energy Directive: fissa gli obiettivi per la quota di energia rinnovabile nel mix energetico complessivo dell'UE promuovendo l'uso di fonti energetiche rinnovabili e stabilisce gli obiettivi nazionali con il fine di aumentare la loro quota di energie rinnovabili.

Energy Efficiency Directive: l'EED mira a migliorare l'efficienza energetica in vari settori, tra cui edilizia, industria e trasporti stabilendo gli obiettivi vincolanti di risparmio energetico e richiedendo misure per promuovere l'efficienza energetica e la gestione dell'energia.

Circular Economy Action Plan: questo piano promuove, invece, un modello di economia circolare incentrato sulla riduzione dei rifiuti, sull'aumento dell'efficienza delle risorse e sulla promozione del riciclaggio e del riutilizzo.

Clean Energy Package: è il pacchetto che comprende regolamenti e direttive per accelerare la diffusione delle fonti energetiche rinnovabili, migliorare l'efficienza energetica e promuovere l'elettrificazione di vari settori.

Climate Law: è il quadro legislativo che stabilisce gli obiettivi e le politiche climatiche vincolanti dell'UE che delinea l'impegno dell'UE per raggiungere **la neutralità climatica entro il 2050**.

Questo obiettivo mira a bilanciare le emissioni di gas a effetto serra con rimozioni o compensazioni, raggiungendo effettivamente uno stato di zero emissioni nette entro il 2050.

Carbon Border Adjustment Mechanism: il CBAM è una proposta volta a prevenire la rilocalizzazione delle emissioni di carbonio imponendo un prezzo del carbonio su determinati beni importati, incentivando i partner globali a ridurre le loro emissioni di carbonio, riducendo il rischio di carbon leakage³.

2. Il Sistema europeo di scambio di quote di emissione di gas a effetto serra (European Union Emissions Trading System - EU ETS) è il principale strumento adottato dall'Unione europea per raggiungere gli obiettivi di riduzione della CO₂ nei principali settori industriali e nel comparto dell'aviazione. Fonte: <https://www.mase.gov.it/pagina/emission-trading>

3. Per carbon leakage si intende il trasferimento della produzione, da parte delle imprese, in paesi con politiche climatiche meno rigorose, con conseguente aumento delle emissioni globali.

1.4 IL RUOLO DELLE CITTÀ PER L'ADATTAMENTO E LA MITIGAZIONE

Il ruolo delle città

Le città sono responsabili di circa il 65%¹ di tutte le emissioni di gas serra e sono i luoghi in cui gli effetti del cambiamento climatico sono più intensi a causa della maggiore concentrazione di persone e beni esposti ai fenomeni estremi (Geneletti et al., 2015). Perciò le città dovranno assumere un ruolo guida nella lotta contro il cambiamento climatico e applicare una risposta di adattamento che «dipende prevalentemente dalle conformazioni spaziali e dalla morfologia degli edifici e degli elementi urbani, nonché dalle tecniche costruttive, dalle prestazioni e da specifiche caratteristiche, quali la massa termica e la riflettanza delle superfici, oltre che dalla presenza di vegetazione. Lo stato fisico, funzionale e prestazionale di questi elementi rappresenta dei fattori predisponenti per il grado di vulnerabilità agli impatti climatici» (D'Ambrosio, 2016).

La città è, ed è sempre stata, il luogo fisico in cui si svolgono la maggior parte delle attività umane, inoltre, oltre ad un agglomerato urbano,

definito dalle sue caratteristiche spaziali e formali, la città è l'emblema dei tratti identitari e culturali di un popolo. Come tale si è sviluppata nel tempo seguendo i vari mutamenti sociali, economici e tecnologici, trasformandosi di conseguenza e adattandosi ad essi (Wang et al., 2020).

Per questo motivo, nel corso dell'ultimo secolo, la città ha subito una sostanziale rivoluzione che l'ha portata ad essere il "contesto geografico dominante per la vita sulla terra" (Chan et al., 2021).

Al 2016 più della metà della popolazione mondiale vive nelle città e la tendenza non sembra cambiare tanto che, secondo recenti stime nel 2050, saranno circa 6 miliardi le persone residenti nelle principali aree urbane (Geneletti et al., 2015). Data questa radicale trasformazione, la città oggi non può più essere vista come un elemento isolato. La nuova dimensione di questa rete di spazi e la sua capacità di coinvolgere un così ampio bacino di persone rende le città, come sistema, un luogo a scala globale, in grado di

«Le città sono responsabili di circa il 65% di tutte le emissioni di gas serra e sono i luoghi in cui gli effetti del cambiamento climatico sono più intensi»

1. L'alta densità abitativa e il concentrarsi di attività antropiche energivore richiedono molta energia rendendo così le città responsabili del 65% delle emissioni di CO2. fonte: Rosenzweig, Solecki, Cities lead the way in climate-change action, 2010

ridefinire e condizionare le caratteristiche spaziali e climatiche dell'intero pianeta (Lee et al., 2014). Se consideriamo il sistema "città" come uno dei fenomeni più importanti al livello globale di questo secolo, è evidente che ci deve essere una correlazione con il cambiamento climatico. Il motivo è sicuramente legato alla natura della città e la sua influenza sull'equilibrio del pianeta (Lee et al., 2014). Basti pensare, a questo proposito, che le "attività urbane", intese come somma di tutte le azioni che le persone compiono all'interno della città, sono responsabili, oltre che alle emissioni carbonio sopra citate, del consumo di circa due terzi dell'energia a livello globale (Steffen et al., 2019).

Se consideriamo poi gli effetti del cambiamento climatico, è chiaro che essi hanno un maggiore impatto sulle città perché esse, per loro stessa natura, sono particolarmente vulnerabili. Un esempio è il fenomeno dell'**isola di calore**, che si verifica nei grandi centri urbani dove superfici artificiali assorbono il calore della radiazione solare e, il rilascio lento nelle ore successive,

provoca un brusco innalzamento delle temperature superficiali (Ward et al., 2016). In particolare, è stata misurata una differenza di circa **7°C** tra aree urbane e il contesto rurale che le circonda, indicando quanto la città ha la capacità di influenzare il microclima (Lee et al., 2014).

Se dunque la città è la principale responsabile del cambiamento climatico ma anche la sua più grande vittima, essa può solo essere parte della soluzione (Steffen et al., 2019).

Scienziati, fisici, medici, ingegneri, architetti e pianificatori stanno iniziando a rispondere a domande specifiche su come le città e l'ambiente urbano si rapportino al cambiamento climatico, e tutti stanno optando per l'adozione di un approccio più olistico, considerando la mitigazione accanto all'adattamento ed alla gestione dei disastri (D'Ambrosio, 2016).

Le città sono il test bed ideale per testare gli sforzi globali di mitigazione e adattamento. L'Agenzia internazionale dell'energia stima nella sua indagine più recente che le aree urbane sono responsabili

del 71% delle emissioni globali di carbonio legate all'energia, questa percentuale è destinata a crescere seguendo l'ampliarsi dell'urbanizzazione (Zhao et al., 2018).

Le vulnerabilità delle città

Il cambiamento climatico pone vari pericoli per le città, esacerbando le vulnerabilità esistenti, introducendo nuovi rischi, aumentando la frequenza e l'intensità degli eventi meteorologici estremi.

Ondate di caldo: l'aumento delle temperature può portare a ondate di caldo più frequenti e intense, che comportano rischi per la salute, soprattutto per le popolazioni vulnerabili nelle aree urbane (Kumar et al., 2016).

Inondazioni: i cambiamenti climatici possono provocare precipitazioni più abbondanti, con conseguenti inondazioni urbane.

Mentre, per quanto riguarda le città costiere, il rischio è costituito dalle mareggiate dovute all'innalzamento del livello del mare.

Tempeste e uragani: le alterazioni degli equilibri climatici

possono contribuire all'intensificarsi di tempeste ed uragani, causando danni significativi alle infrastrutture, alle proprietà e mettendo a rischio la vita nelle città costiere (Djordjevic et al., 2011).

Innalzamento del livello del mare ed erosione costiera:

Le città costiere affrontano la minaccia dell'innalzamento del livello del mare, che porta a una maggiore erosione costiera, inondazioni e intrusioni di acqua salata. Ciò comporta rischi per le infrastrutture, le fonti di acqua potabile e le comunità costiere vulnerabili (Siegel, 2019).

Scarsità d'acqua e siccità: le alterazioni dei modelli delle precipitazioni possono portare scarsità d'acqua e condizioni di siccità in alcune regioni (Ray et al., 2019).

Aumento dell'inquinamento atmosferico:

Il cambiamento climatico può peggiorare la qualità dell'aria nelle città, principalmente attraverso l'interazione di temperature più elevate con gli inquinanti atmosferici. Le ondate di calore possono esacerbare lo smog e aumentare la formazione

di ozono a livello del suolo (Balogun, 2021).

Impatti su infrastrutture e servizi: il corretto funzionamento delle infrastrutture cruciali, comprese le reti di trasporto, gli ospedali, le reti elettriche ed i sistemi idrici e fognari può essere compromesso da eventi straordinari, causando l'interruzione dei servizi essenziali e provocando perdite economiche (Djordjevik et al., 2011).

Danni ecologici:

il cambiamento climatico può sconvolgere gli ecosistemi urbani, influenzando la biodiversità. Le variazioni nei modelli di temperatura e precipitazioni possono avere un impatto sugli spazi verdi urbani e sugli habitat della fauna selvatica. (Kumar et al., 2016).

Sfide sociali ed economiche:

le popolazioni vulnerabili, come le comunità a basso reddito, possono affrontare impatti sproporzionati a causa dell'accesso inadeguato alle risorse, all'assistenza sanitaria e alla limitata capacità di adattamento ai cambiamenti climatici (Ray et al., 2019).

Climate Action

A livello Europeo, l'Unione ha lanciato l'iniziativa del Patto dei Sindaci (Covenant of Mayors) mirando a coinvolgere e sostenere le città nell'impegno al raggiungimento degli obiettivi di mitigazione e adattamento al clima dell'UE. Le città firmatarie si impegnano a sostenere l'attuazione dell'obiettivo di riduzione del 40% dei gas serra entro il 2030 e l'adozione di un approccio comune per affrontare la mitigazione e l'adattamento ai cambiamenti climatici.

Il Patto è stato lanciato nel 2008 con l'ambizione di riunire i governi locali impegnati volontariamente a raggiungere e superare gli obiettivi climatici ed energetici dell'UE. Nel 2014, *Mayors Adapt*, iniziativa del Patto dei sindaci sull'adattamento ai cambiamenti climatici, è stata istituita dalla Commissione europea come una delle azioni della Strategia di adattamento dell'UE per coinvolgere le città nell'adozione di misure di adattamento ai cambiamenti climatici. Nel 2015 la Commissione europea ha unito le due iniziative nel tentativo di promuovere un approccio integrato all'azione per il clima

e l'energia (climate-adapt.eea.europa.eu/en/eu-adaptation-policy/covenant-of-mayors, 2023).

Altra iniziativa dell'UE è "100 climate neutral and smart cities initiative" promossa da NetZeroCities che fa parte del programma di ricerca e innovazione a sostegno del Green Deal. Gli obiettivi della missione sono di raggiungere 100 città europee climaticamente neutre entro il 2030 e di garantire che queste città agiscano come hub di sperimentazione e innovazione per consentire a tutte le città europee di seguirne l'esempio entro il 2050 (netzerocities.eu/, 2023).

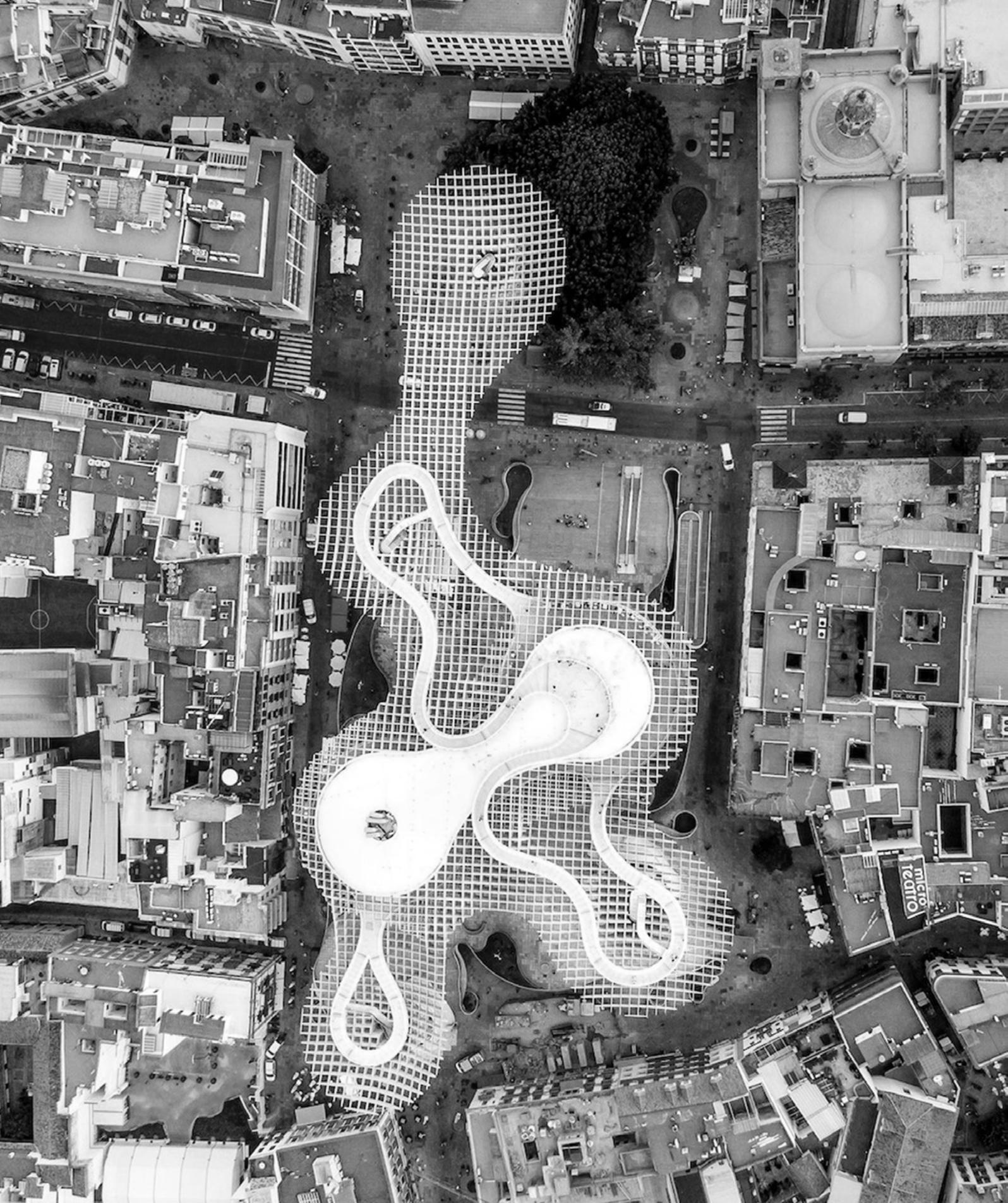
Lo sforzo delle città alla lotta al cambiamento climatico a livello globale è rappresentato dal "World Mayors Council on Climate Change" (WMCCC) fondato dal sindaco di Kyoto nel dicembre 2005, in seguito all'entrata in vigore del Protocollo di Kyoto (Acuto et al., 2019). C40² negli anni si è sostituita al WMCC e oggi è una rete di quasi 100 città cruciali che collaborano per fornire l'azione urgente e necessaria per affrontare la crisi climatica testando misure di mitigazione, monitoraggio

e adattamento.

Il C40 Climate Action Planning Framework è stato creato per sostenere le città nello sviluppo di piani d'azione sul clima fondamentali per raggiungere gli obiettivi dell'Accordo di Parigi. Per rispettare l'obiettivo di 1,5 °C, la pianificazione dell'azione sul clima deve portare ad un cambiamento rapido e sistemico nelle città di tutto il mondo (Román, 2010). Per raggiungere questo obiettivo, le emissioni medie pro capite in tutte le città C40 devono scendere da oltre 5 tCO₂eq pro capite a circa 2,9 tCO₂eq pro capite entro il 2030 (Rosenzweig et al., 2010).

2. C40 è una rete di sindaci di quasi 100 città leader a livello mondiale che collaborano per fornire l'azione urgente necessaria per affrontare la crisi climatica. Il programma per il clima di C40 sostiene le città di tutto il mondo nella creazione e nell'attuazione di piani d'azione per il clima in linea con l'obiettivo del limite di +1,5°C dell'Accordo di Parigi. fonte: <https://www.c40.org/about-c40/>

3. Figura 1.4.1 Metropol Parasol a Siviglia nella Plaza de la Encarnación, progettato dall'architetto tedesco J.MAYER.H, 2004-2011. La struttura di legno ingegnerizzato e cemento funge da brise soleil riparando la piazza sottostante dalle radiazioni dirette, in una delle città più calde d'Europa. Fonte: <https://jmayerh.de/metropol-parasol/>



1.5 IL RUOLO DELLE UNIVERSITÀ PER L'ADATTAMENTO E LA MITIGAZIONE

Le università stanno sempre più acquisendo consapevolezza sulla loro responsabilità di preparare gli studenti e la società a contribuire attivamente alla mitigazione e all'adattamento ai cambiamenti climatici (Cordero et al., 2020).

Secondo la guida Sustainable Development Solutions Network¹ (SDSN) intitolata "Getting Started with the SDGs in Universities", sono quattro, invece, gli ambiti di azione principali in cui le università possono contribuire agli SDGs: **istruzione, governance, ricerca e leadership nella ricerca** (unsdsn.org, 2023).

L'**istruzione** rappresenta uno dei pilastri fondamentali degli SDGs. Di per sé, un'educazione di qualità apporta benefici significativi per lo sviluppo sostenibile degli individui, delle comunità e dei Paesi. Inoltre, essa è uno strumento essenziale per sostenere e accelerare la capacità globale di raggiungere gli SDGs. Di conseguenza, le università giocano un ruolo di grande importanza nell'attuazione degli SDGs attra-

verso una varietà di attività di apprendimento e insegnamento, che includono l'istruzione universitaria e post-laurea, la formazione professionale, le attività extracurricolari e le associazioni studentesche. Gli SDGs riconoscono l'importanza dell'Educazione per lo Sviluppo Sostenibile nell'**Obiettivo 4**, che promuove l'accesso a un'istruzione di qualità equa e inclusiva e opportunità di apprendimento continuo per tutti.

La **ricerca** è un catalizzatore per il raggiungimento degli SDGs, la comunità globale si troverà di fronte a diverse sfide difficili e complesse a livello sociale, economico e ambientale. Alcune di queste sfide richiederanno trasformazioni nel modo in cui la società e l'economia funzionano e interagiscono con il nostro pianeta. Le università, attraverso le loro competenze e attività di ricerca, svolgono un ruolo fondamentale nel fornire la conoscenza necessaria, le evidenze di base, le soluzioni e le innovazioni per affrontare tali compiti. La realiz-

1. La Sustainable Development Solutions Network (SDSN) è una rete globale di istituzioni di ricerca, università, organizzazioni della società civile e altre entità che lavorano insieme per promuovere l'implementazione degli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDGs) delle Nazioni Unite. È stata lanciata nel 2012 dal Segretario Generale delle Nazioni Unite per mobilitare gli sforzi a livello globale per raggiungere gli SDGs entro il 2030.

zazione degli obiettivi degli SDGs richiede esplicitamente l'attività di ricerca per l'implementazione dei 17 Obiettivi di Sviluppo Sostenibile. I target (traguardi) attinenti alla ricerca svolta all'interno dell'università sono **SDG 2,3,4,7,12,14 e 17** (unsdsn.org, 2023).

Leadership esterna:

Gli SDGs richiedono la mobilitazione di tutti i settori, come affermato dalle Nazioni Unite nel documento "Trasformare il nostro mondo". Coinvolgerà governi, organizzazioni internazionali, autorità locali, società civile, settore privato, comunità scientifica e tutti gli individui. La collaborazione è essenziale, come indicato nell'**Obiettivo 17**, target 17.16, che promuove il partenariato globale per il raggiungimento degli SDGs. Questa mobilitazione e collaborazione richiedono una leadership forte e un sostegno significativo per coinvolgere tutte le parti interessate, sviluppare la comprensione e l'attuazione degli SDGs e facilitare il dialogo e la partnership tra settori diversi. Le università, come istituzioni dedicate alla diffusione della conoscenza, godono di

una posizione unica e fiducia della società. La **governance** organizzativa, la promozione culturale e le attività delle università sono importanti per gli SDGs perché ogni organizzazione genera un certo tipo di impatto all'interno della propria sfera di influenza. Le università spesso svolgono un ruolo importante come datori di lavoro, consumatori, investitori e proprietari di immobili. Supervisionano grandi comunità di personale, studenti e fornitori. I loro campus possono funzionare come vere e proprie città, richiedendo investimenti in infrastrutture nelle aree circostanti. Inoltre, possono avere un'influenza che si estende ben oltre le loro aree geografiche attraverso le catene di fornitura e una crescente portata internazionale.

Le azioni dirette

La Rete delle Università per lo Sviluppo sostenibile (RUS), dal 2017 si occupa di fornire le linee guida per la redazione degli inventari delle emissioni di CO₂ e altri gas inquinanti (CH₄, N₂O e F-gas) delle università italiane e tra le quali anche il Politecnico di Torino e di definire le "Linee guida per la redazione dei

piani di mitigazione delle emissioni di CO₂ degli atenei" e "linee guida e buone pratiche per l'adattamento" (Caserini et al., 2023).

Un **inventario** considera solitamente le emissioni dirette, ed eventualmente le principali emissioni indirette come quelle legate ai consumi di energia elettrica o energia. Le emissioni vengono raggruppate in 6 categorie: 1 - emissioni dirette; 2 - emissioni indirette da energia importata; 3 - emissioni indirette derivanti dai trasporti; 4 - emissioni indirette da prodotti utilizzati dall'organizzazione (merci acquistate, servizi usufruiti). 5 - emissioni indirette associate all'uso di prodotti provenienti dall'organizzazione; 6 - emissioni indirette derivante da altre fonti (Caserini et al., 2023).

Le tipologie di emissioni che possono essere considerate nell'obiettivo di riduzione delle emissioni dell'Ateneo sono i settori inclusi nell'inventario delle emissioni di cui sopra ed è un passaggio fondamentale per passare alla stesura del **piano di mitigazione di ateneo**¹, dove si va ad agire sui punti più critici emergenti dall'inventario delle emissio-

ni (Caserini et al., 2023). Il piano di Mitigazione deve assumere come anno di riferimento il primo anno di cui è disponibile un quadro delle emissioni dell'Ateneo e visto che gli orizzonti temporali considerati per gli impegni di riduzione delle emissioni in ambito europeo e internazionale sono il 2030 e il 2050, anche in questo ambito possono essere adottati le stesse deadline. Gli obiettivi minimi di riduzione delle emissioni di CO₂ sono la riduzione delle emissioni dell'Ateneo del 20% entro il 2030 rispetto al primo anno di riferimento ed emissioni nette zero entro il 2050. Nel complesso, i campus universitari sono spazi critici per sviluppare soluzioni, educare i cittadini, testare nuove idee e ispirare azioni quando si tratta di adattare e mitigare gli effetti del riscaldamento globale (Reimers, 2020). Di seguito i casi studio selezionati, essi trattano sotto punti di vista diversi interventi originali di adattamento o mitigazione. Sono stati scelti quattro best practises con interventi all'interno di campus universitari e un caso studio sulla simulazione del microclima della Sapienza a Roma.

1. Un piano di mitigazione di ateneo, o piano di mitigazione delle emissioni di una istituzione accademica, è un documento strategico che identifica, misura e riduce le emissioni di gas serra e altri impatti ambientali derivanti dalle attività dell'ateneo. Questo piano mira a mitigare il contributo dell'istituzione al cambiamento climatico e ad adottare misure per promuovere la sostenibilità ambientale.

1.5.1 CAMPUS BONARDI - MILANO

LA RIQUALIFICAZIONE CAMPUS DI ARCHITETTURA DEL POLITECNICO DI MILANO

Cliente: Politecnico di Milano

Progettisti: ODB - OTTAVIO DI BLASI & Partners

Partner: Renzo Piano - RPBW

Tipologia: Rigenerazione/ampliamento di un Campus universitario

Dimensione: 7.700 mq

Anni: 2018/2021

Il piano strategico di adattamento climatico adottato dall'ateneo di Milano ha portato al processo edilizio che ha avuto luogo nell'area intorno a via Bonardi. Sede universitaria nata dal dopoguerra, su progetto anche di Gio Ponti, ora sovraccarica di edifici disposti senza seguire un disegno unitario e con una scarsa qualità ambientale esterno.

L'Università si è dunque orientata ad una riorganizzazione e riqualificazione dell'area al fine di migliorarne la qualità edilizia e la funzionalità, portando un miglioramento degli spazi aperti e di studio a beneficio degli studenti.

Il nuovo polo universitario nasce dall'impegno di Renzo Piano, che ha donato lo schizzo dell'idea progettuale al Politecnico di Milano, sviluppato poi dallo studio ODB-OTTAVIO DI BLASI & Partners. Il progetto ha proposto una radicale revisione degli spazi del Campus, in base alle esigenze degli studenti e pensati per essere aperti, internazionali e all'avanguardia. Le caratteristiche principali includono una grande quantità di verde e l'accesso a due edifici storici, nonché terrazze utilizzabili sui tetti di edifici bassi. Il piano interrato è particolarmente adatto, invece, ad eventi e raduni.

Pertanto, l'obiettivo era quello di creare quattro nuovi edifici a questo livello, sufficientemente bassi per garantire la perfetta visibilità dalla strada dei fabbricati di Giò Ponti già presenti, in particolare la "Nave" e il "Trifoglio". I nuovi edifici ospitano un laboratorio all'avanguardia per la modellazione architettonica, le tecnologie digitali e di progettazione, oltre ad aule e ulteriori aree studio. Nell'ottica di migliorare il comfort esterno degli spazi e renderli più piacevoli, anche nei torridi mesi estivi milanesi, il vecchio edificio usato come laboratorio di modellazione è stato eliminato, per aumentare lo spazio aperto a disposizione degli studenti e sostituito da un parco che collega il nuovo patio, le aule, il "Trifoglio" e la "Navata". Così la pavimentazione in cemento e i parcheggi interni a raso sono stati eliminati e spostati sotto terra, rendendo gli edifici più fruibili e migliorando la qualità percepita dell'ambientale. L'obiettivo dei progettisti è stato rendere la città un luogo migliore e più confortevole e ciò si è tradotto nel aprire i loro ambienti a più luce, creare luoghi di collettività sui nuovi

spazi verdi, condivisi con la città e aperti a tutti.

Il progetto portato a termine da Ottavio Di Blasi - ODB&Partners si è trattato quindi di una radicale riorganizzazione degli spazi del complesso di via Bonardi e della sua trasformazione in un moderno Campus Urbano, in particolare:

- nuovi edifici di una superficie di 4.000 mq sono parzialmente ipogei e contengono aule per 800 studenti
- l'Architectural Model Lab di 1600 mq, fuori terra con strutture per la modellistica tradizionale (legno e resina) e impianti di stampa digitale e 3D.
- La Student Lobby si trova al livello del pilotis dell'edificio Nave, sormontata da terrazze accessibili, le strutture si trovano immerse in una foresta di oltre 130 alberi.
- Il parco, denominato "parterre" di 7000 mq è uno spazio all'aperto attrezzato con panchine

1. Figura 1.5.1.1 Copertura di vetro, con pannelli fotovoltaici integrati. *Fonte: <https://www.odp.it/projects/campus-di-architettura-al-politecnico-di-milano/>*

2. Figura 1.5.1.2 Architectural Model Lab *Fonte: <https://www.odp.it/projects/campus-di-architettura-al-politecnico-di-milano/>*

3. Figura 1.5.1.3 giardino Perterre e lobby degli studenti. *Fonte: <https://www.odp.it/projects/campus-di-architettura-al-politecnico-di-milano/>*

4. Figura 1.5.1.4 giardino Perterre e lobby degli studenti. *Fonte: <https://www.odp.it/projects/campus-di-architettura-al-politecnico-di-milano/>*

5. Figura 1.5.1.5 Tettoia di vetro, con pannelli fotovoltaici integrati e main building *Fonte: <https://www.odp.it/projects/campus-di-architettura-al-politecnico-di-milano/>*

elettroniche ombreggiate da alberi.

- Demolizione di oltre 7000 mq di cemento

Gli spazi aperti sono stati pensati per raggiungere un livetto di ombreggiatura tale da renderli piacevoli per essere sfruttati nei caldi mesi estivi. Oltre all'ombreggiamento naturale, parte del perterre e sormontata da una struttura di brise soleil in vetro da supporto ad un impianto fotovoltaico.

Considerazioni

Il progetto del Polimi si concentra sul miglioramento della qualità dei campus attuando molteplici azioni di rigenerazione degli spazi aperti. All'interno di queste azione la rigenerazione del Campus Bonardi porta con sé alcuni risultati positivi; l'eliminazione di 7.000 mq di cemento sostituiti da prato e 130 alberi ha sicuramente un impatto positivo sul comfort di quegli spazi, che diventano ora più fruibili durante tutto il periodo dell'anno. Inoltre la scelta, per quanto riguarda la finitu-

ra esterna degli edifici, è ricaduta su materiali chiari con alto albedo e quindi grande capacità di riflessione dei raggi solari.

Figura 1.6.11





Figura 1.5.1.2



Figura 1.5.1.3

Figura 15.14



Figura 15.15



1.5.2 SCIENCESPO - PARIGI

LA RIGENERAZIONE E CONVERSIONE DI UN EDIFICIO STORICO E LE SUE CORTI

Cliente: Instituts d'études politiques

Progettisti: Sasaki Associates

Partner: Wilmotte & Associés and Moreau Kusunoki

Tipologia: Conversione di un edificio storico in campus universitario

Dimensione: 3.000 mq

Anni: 2017/2022

Il programma di questo intervento era centrato sul recupero di uno storico gruppo di edifici nel cuore del 7° arrondissement di Parigi, l'Hôtel de l'Artillerie, nato come monastero domenicano nel 1632 per assumere poi un ruolo militare fino al 2016 quando passò di proprietà all'università.

I lavori iniziati nel 2017 da un gruppo composto da Wilmotte & Associés, dagli architetti Moreau Kusunoki, hanno trasformato il complesso in sette scuole, dieci centri di ricerca e la scuola di giornalismo riuniti su un unico lotto di 14.000 mq.

Il trattamento degli spazi esterni

Lo schema portato dallo studio Sasaki, per la progettazione degli spazi esterni, sfrutta i cortili del complesso esistente per stabilire una sequenza di spazi esterni che sono accuratamente integrati con attività accademiche, sociali e di ricerca. Il sito presenta la particolarità di avere tre corti storiche da poter utilizzare per portare gli studenti a vivere gli spazi esterni. A tutte e tre è stato riservato un trattamento differente, con lo scopo comune di renderle più confortevoli possibili. Nello specifico gli interventi eseguiti sugli spazi outdoor

sono stati:

- Rimozione della pavimentazione lapidea sulle due corti minori
- Costruzione dell'anfiteatro ipogeo sulla corte principale
- Sistema automatico di schermatura solare del forum
- Nuovi spazi verdi per un superficie complessiva di 3.000 mq
- Piantumazione di oltre 150 alberi ad alto fusto

Il cuore *de l'Artillerie*, il Learning Garden della corte maggiore, crea un forum semi-ipogeo per l'insegnamento, eventi e conferenze collegato alla nuova biblioteca e al nuovo padiglione che ospita spazi di co-working, una caffetteria e sala espositiva. La fruibilità di questo spazio esterno è pensata per essere sfruttata anche nella stagione estiva durante le lezioni della *Summer School* e quindi fornita di una

tecnologica copertura solare mobile che viene rimossa nella stagione più fredda.

La creazione di un'arteria di circolazione interna e di nuovi assi di circolazione permettono la creazione di una base unificante che mette in continuità gli edifici storici, cortili, i nuovi spazi verdi e orti tra di loro e che lega inoltre il campus con il suo quartiere, rendendolo accessibile a chiunque desideri ristoro.

I nuovi spazi verdi di SciencePo sono solo un altro modo in cui questa prestigiosa università si assicura che i suoi studenti abbiano accesso a spazi multifunzionali outdoor confortevoli anche nelle più calde giornate estive.

1. Figura 1.5.2.1 Dettaglio gradoni corte ipogea principale. Fonte: <https://moreaokusunoki.com/project/sciences-po/>

2. Figura 1.5.2.2 Render schermatura solare di tessuto distesa. Fonte: <https://moreaokusunoki.com/project/sciences-po/>

3. Figura 1.5.2.3 Corte ipogea e nuovo edificio per aule studio. Fonte: <https://moreaokusunoki.com/project/sciences-po/>



Figura 15.21

Figura 1.5.2.2



Figura 1.5.2.3



1.5.3 LA PLAYITA GARDEN - MESSICO

IL GIARDINO SEMI OMBREGGIATO DELL'UNIVERSITÀ DI MONTERREY

Cliente: Universidad de Monterrey

Progettista: Joshua Ascencio

Tipologia: Riqualificazione giardino universitario

Dimensione: 3.000 mq

Anni: 2021

L'opera dell'architetto messicano è situata nel nucleo centrale e storico degli edifici scolastici del campus dell'Università di Monterrey nello stato del Nuevo León non lontano dal confine con il Texas. Il clima è caratterizzato da temperature medie elevate ma secco grazie ai venti che soffiano dalle montagne della Sierra Madre.

Il concept

L'idea principale di questo progetto era quella di trasformare uno dei giardini, utilizzato principalmente come area circolatoria, in uno spazio ricreativo all'aperto a

disposizione degli studenti e dello staff universitario durante i periodi di pausa. Importante era dunque trovare il modo di garantire un livello di comfort tale da portare gli studenti a fermarsi all'aperto per svolgere una serie di attività, tra cui lo studio, consumare pasti e socializzare riducendo, la sensazione di stress termico a cui sono soggetti tutti coloro che si riuniscono all'aperto in un clima estremamente caldo tipico del nord del Messico durante la maggior parte dell'anno.

Il progetto ha consistito nella costruzione di percorsi delineati a terra da listelli di legno, che garantissero

ro la permeabilità del terreno, ma contemporaneamente indicassero le aree, su cui tramite anche oggetti di arredo urbano mobili, si potessero svolgere le varie attività.

L'inserimento poi di un pergolato in acciaio sopra i persorsi calpestabili, rende il giardino semi ombreggiato, mantenendo le piante già presenti e aumentando lo spazio di crescita di quelle nuove che crescendo contribuiranno sia a riparare da raggi solari diretti le persone sottostanti sia a migliorare la qualità dell'aria del giardino.

Il controllo della direzione dei flussi di studenti, porta ora a raggrupparsi all'esterno, in uno spazio ombreggiato e circondato da vegetazione, decongestionando gli spazi interni e limitando così, quando non utilizzati, anche l'uso della climatizzazione interna.

1. Figura 1.5.3.1 Vista complessiva della corte e delle strutture di acciaio con la vegetazione. Fonte: <https://www.archdaily.com/983038/la-playita-garden-joshua-ascencio/>

2. Figura 1.5.3.2 Dettaglio dei percorsi interni ombreggiati. Fonte: <https://www.archdaily.com/983038/la-playita-garden-joshua-ascencio/>

3. Figura 1.5.3.3 Vista complessiva della corte e delle strutture di acciaio con la vegetazione. Fonte: <https://www.archdaily.com/983038/la-playita-garden-joshua-ascencio/>



Figura 1.5.3.1

Figura 15.3.2



Figura 15.3.3



1.5.4 RODDA LANE - MELBOURNE

1.6.2 BEST PRACTISE: IL CASO STUDIO DEL GIARDINO SEMI OMBREGGIATO DEL CAMPUS

Cliente: RMIT University

Progettista: Sibling Architecture

Tipologia: Riqualificazione giardino universitario

Dimensione: 7.000 mq

Anni: 2021

La riprogettazione del distretto universitario di Rodda Lane ha notevolmente migliorato la qualità dell'ambiente costruito all'interno del campus. Dal punto di vista climatico la città australiana in cui si trova il campus è privilegiata con un clima mite ed estati, fino ad ora, mai troppo calde; questo rende fondamentale avere degli spazi outdoor confortevoli per i cittadini e in questo caso studenti. La fornitura di questi nuovi spazi esterni offre l'opportunità a vari gruppi di utenti di godersi la sfera pubblica del campus in un modo nuovo, avendo a disposizione più ombreggiamento e spazio verde.

Situato tra più scuole ed edifici, il progetto unifica con successo il campus creando un insieme unico. Il progetto offre l'opportunità di aumentare la biodiversità, portando il verde in quelli che erano spazi urbani trascurati e cementificati, Rodda Lane fa parte della rivitalizzazione del patrimonio costruito del RMIT University che unisce un labirinto di vicoli interni per fornire un nuovo punto focale al campus della città attraverso l'aggiunta di spazi esterni flessibili. Il design si concentra su due cortili che diventano il perno dell'attività sociale: qui, nuove sedute e strutture d'ombra pergolate

si inseriscono tra le nuove aiuole e orti. Questi cortili sono uniti da strette viuzze delimitate da imponenti volumi verticali in cui nuove sedute cercano di accentuare gli spazi esistenti fornendo nuovi luoghi in cui sostare. Tutte queste infrastrutture urbane multiple consentono spazi e usi diversi.

Il progetto estende il tessuto della città della città di Melbourne e all'interno dell'università e così l'approccio progettuale cerca di introdurre una nuova identità al piano terra. Per creare un senso di spazio e coesione, una forte tavolozza singolare è stato utilizzato per incollare questi spazi insieme. Le tonalità blu, grigio chiaro e bianco fanno da contrappunto alla tavolozza esistente. Questo rafforza l'attaccamento al luogo per gli utenti. La pavimentazione realizzata con materiali freddi assieme alle strutture di ombreggiatura e la vegetazione contribuiscono assieme a rendere gli spazi aperti tra i vari edifici del campus piacevoli e renderli luoghi di aggregazione per eccellenza all'interno di quel panorama universitario.

1. Figura 1.5.4.1 Vista complessiva della corte e delle strutture di acciaio. Fonte: <https://www.archdaily.com/968590/rod-da-lane/>

2. Figura 1.5.4.2 Dettaglio delle strutture per la schermatura solare. Fonte: <https://www.archdaily.com/968590/rod-da-lane/>

3. Figura 1.5.4.3 Dettaglio delle strutture per la schermatura solare. <https://www.archdaily.com/968590/rod-da-lane/>



Figura 15.4.1



1.5.5 LA SAPIENZA - ROMA

LA RICERCA SUI TETTI E LE SUPERFICI NON PERMEABILI DELL'UNIVERSITÀ ROMANA

Tipologia: Simulazione termo climatiche su ENVI-met

Dimensione: 84.000 mq

Anni: 2018

Un'altro approccio è stato ricercare le simulazioni climate su eventuali soluzioni progettuali di adattamento climatico delle università. L'analisi condotta a Roma simula dunque due opzioni di intervento su alcuni spazi aperti dell'ateneo per comprendere quali siano le combinazioni di strategie più efficaci per migliorarne il comfort esterno.

L'area oggetto della simulazione è situata nella seconda municipalità del comune di Roma. Città caratterizzata da un clima mediterraneo, e secondo le classificazioni Köppen-Geigen è secco-subtropicale.

Il campus universitario (circa 44 ettari) è stato scelto per la sua rilevanza culturale, storica, sociale e architettonica.

si concentra su una specifica area dell'Università, al fine di focalizzare l'attenzione sulle caratteristiche dei materiali dell'ambiente costruito e di analizzare l'effetto che varie combinazioni di materiali e di vegetazione possono avere sulle condizioni microclimatiche.

In particolare, il sito oggetto di studio è una superficie quadrangolare di 84.000 m² e comprende due aree principali: il viale centrale nel settore sud-orientale del Campus, Viale Piero Gobetti, e la collegata Piazza Minerva.

Il lotto considerato risulta costruito per il 44%, mentre gli spazi aperti misurano il 56% di cui il 19% sono permeabili.

Simulazione

Per lanciare le simulazioni è stato usato il software ENVI-met, l'obiettivo principale è quello di studiare l'impatto delle varie combinazioni in termini di verde (erba e alberi) e albedo dei materiali urbani, sia a livello del suolo che delle coperture, sul microclima esterno e il comfort termico.

Le simulazioni sono state eseguite attraverso l'uso di un modello tridimensionale considerando 4 parametri: pavimentazione, vegetazione, dati climatici ed altezza edifici.

La prima simulazione è stata lanciata con lo **Scenario 0**, la condizione iniziale del Campus universitario, che rappresenta la base di partenza per l'analisi microclimatica e il confronto con i scenari progettuali proposti.

Per le successive due simulazioni sono stati proposti due scenari di adattamento, ciascuno dei quali prevede combinazioni di superfici verdi e cool materials. (Sono materiali organici o inorganici, con elevato SRI, indice di riflettanza solare, ovvero con straordinaria capacità di respingere la radiazione solare)

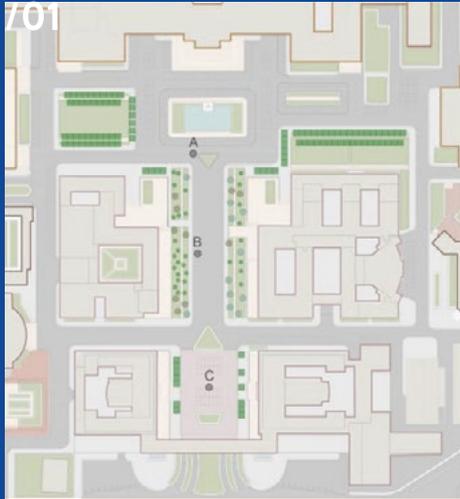
In particolare al livello pedonale del suolo e al livello delle coperture.

Le pareti e le facciate degli edifici sono state escluse dalla proposta di trasformazione per focalizzare l'attenzione sulle superfici del suolo e dei tetti e in secondo luogo, a causa dei vincoli di conservazione architettonica per quanto riguarda l'aspetto facciate.

Sono state prese in considerazione le seguenti strategie generali:

- Aumento della permeabilità della pavimentazione delle superfici esterne del 50%,
- Tetti di cemento convertiti in tetti verdi fino al 50%,
- Cambiamento del 50% dei marciapiedi in marciapiedi colorati (cool materials, albedo 0,40),
- Cambiamento della superficie totale dei tetti in tetti freschi (albedo 0,65).

701



Scenario 0

Figura 1.5.5.1



Scenario 1

Figura 1.5.5.2



Scenario 2

Figura 1.5.5.3

Pertanto, i due scenari di mitigazione sono stati sviluppati come segue:

- Scenario 1: modifica dei marciapiedi urbani in superfici permeabili miste, in particolare pavimentazioni permeabili in piastrelle di cemento ed erba, e la conversione della superficie totale del tetto livello in tetti freddi (albedo 0,65);
- Scenario 2: modifica dei marciapiedi urbani con pavimentazioni di materiali colorati con un albedo elevato (compreso tra 0,45 a 0,89) e la conversione delle superfici del tetto in tetti verdi.

Risultati

Durante l'esperimento sono state impiegate alcune tecniche di raffreddamento per la mitigazione e adattamento al cambiamento climatico degli spazi aperti urbani all'interno della Sapienza, in una tipica giornata estiva (15 luglio). L'ipotesi primaria di questo studio era che in l'estate l'installazioni di marciapiedi permeabili, realizzati con pavimentazione in cemento ed erba, e/o marciapiedi con materiali freschi e l'uso di tetti freschi e/o tetti verdi a livello dell'edificio, potesse creare un generale raffrescamento della temperatura ambientale, con un conseguente effetto positivo sul comfort termico umano.

Per le considerazioni finali si può affermare che lo scenario 0 fosse già particolarmente favorevole: infatti, presenta un sistema di filari di piante e i suoi marciapiedi, e sulla piazza presenta tre giardini distribuiti sui lati corti.

Le variazioni tra gli scenari di ristrutturazione (S1, S2) da un lato e la condizione iniziale (S0) dall'altro sono di intensità limitate ma comunque rappresentative delle prestazioni di adattamento ed efficienza delle tecnologie cool e green analizzate. Si nota come ad una marcata variazione di Temperatura corrisponda no piccole variazioni di PET tra i due scenari di ristrutturazione (Del Serrone, 2022).

1. Figura 1.5.5.1 Scenario 0

2. Figura 1.5.5.2 Scenario 1

3. Figura 1.5.5.3 Scenario 3

1.6 L'ESEMPIO DEL GREEN TEAM POLITO: VISIONE PER UN CAMPUS SOSTENIBILE

Il Politecnico di Torino dimostra un forte impegno verso la sostenibilità, come sottolineato nel suo Statuto del 2019, in particolare nell'articolo 2, che riguarda le finalità dell'ateneo, si dichiara l'intenzione di contribuire ad un processo di sviluppo basato sulla coesione sociale e sulla sostenibilità, inclusa quella ambientale. Questo impegno viene ulteriormente approfondito nel Piano Strategico di Ateneo 2018-2024 (PoliTO4Impact), che identifica obiettivi specifici quali la promozione di pratiche educative innovative e transdisciplinari, lo sviluppo di studi sull'efficacia delle politiche volte a sensibilizzare la comunità accademica, il miglioramento delle performance di sostenibilità del campus universitario e l'allineamento con i 17 Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG) dell'Agenda 2030.

Al fine di garantire un costante impegno nei confronti dell'Agenda 2030, il PoliTO ha istituito un gruppo di lavoro specifico, Green Team, attivo dal 2015, con l'obiettivo di guidare l'università verso l'integrazione completa delle tematiche

della sostenibilità nelle attività di ricerca, insegnamento e terza missione. In generale, il Green Team si occupa della progettazione e pianificazione di attività e strategie di ateneo rivolte alla sostenibilità ambientale (Report di sostenibilità 2021, PoliTO).

Ambiti

Le attività si estendono non solo a iniziative di natura infrastrutturale e gestionale, ma anche alla sensibilizzazione e promozione dell'Agenda 2030, alla formazione e al sostegno delle politiche di transizione ecologica, sia all'interno che all'esterno della comunità locale, coinvolgendo anche aziende e cittadini (Report di sostenibilità 2021, PoliTO). Le attività del Green Team del Politecnico sono organizzate in cinque ambiti tematici: **Energia e Clima, Risorse, Educazione, Mobilità e Trasporti, Inclusione ed Equità**. Ogni gruppo di lavoro sviluppa le proprie iniziative attraverso linee d'azione mirate a obiettivi specifici.

Energia e clima: Questo impegno viene realizzato attraverso l'u-

utilizzo dell'energia nelle strutture esistenti, mediante l'implementazione di soluzioni di efficientamento energetico. Progettazione delle nuove sedi secondo elevati standard di qualità, tenendo conto delle pratiche di sostenibilità ambientale. Si preferisce il riutilizzo delle strutture esistenti e si adottano criteri che promuovono la sostenibilità (Protocollo ITACA, LEED). Utilizzo di impianti efficienti e adozione di energia autoprodotta da fonti rinnovabili. Monitoraggio costante dei consumi energetici e termici al fine di gestire in modo più efficace l'energia utilizzata.

Risorse: Le azioni messe in atto dall'Ateneo in materia di Risorse comprendono:

La gestione dello smaltimento dei rifiuti, con l'obiettivo di ridurli e razionalizzarli al fine di minimizzare il loro impatto ambientale. L'approccio adottato segue il principio del "riuso-riciclo-riduzione", con l'obiettivo di completare il ciclo di vita del prodotto in modo sostenibile.

La gestione della risorsa idrica, attraverso il monitoraggio dei consumi e la promozione di strategie per ri-

durre gli sprechi.

La valorizzazione della sostenibilità delle filiere agro-alimentari, promuovendo l'utilizzo di prodotti locali e incentivando i fornitori di ristorazione collettiva all'interno dell'ateneo a seguire linee guida sostenibili.

La gestione responsabile degli acquisti di beni di consumo, seguendo le linee guida del green public procurement (Protocolli APE) selezionando fornitori e prodotti che rispettino l'ambiente, senza però trascurare l'aspetto economico e la convenienza degli approvvigionamenti.

Educazione: La promozione della cultura della sostenibilità attraverso una serie di azioni rivolte sia alla sua comunità interna che alla comunità locale e al territorio circostante. Attraverso la linea di azione dedicata all'educazione, viene supportata la diffusione della cultura degli SDGs in Ateneo e attraverso il rafforzamento delle reti di collaborazione locali, nazionali e internazionali, sui temi della sostenibilità e dell'Agenda 2030.

Mobilità e trasporti: L'Ateneo si impegna ad incentivare l'uso dei mezzi di trasporto condivisi, i mezzi

pubblici, promuovere la mobilità pedonale e ciclabile, e favorire in generale forme di mobilità motorizzata a basso impatto ambientale.

Le azioni messe in atto includono la promozione dell'uso del trasporto condiviso, con particolare attenzione ai mezzi pubblici e alla mobilità come servizio, attraverso incentivi e convenzioni.

Inclusione ed equità:

Vengono raccolte e sintetizzate tutte le azioni svolte in Ateneo su queste tematiche da diverse strutture, fungendo da osservatorio critico sulle disuguaglianze, discriminazioni e forme di ingiustizia, ma anche come vetrina per le azioni e i servizi centrati sul diritto allo studio, sulle politiche inclusive e sulla riduzione delle barriere. L'obiettivo è rappresentare le iniziative legate alla diversità, all'equità e all'inclusione sviluppate, stimolando l'intera comunità accademica, compresi gli stakeholder, a lavorare su questi temi. Consolidando così una cultura della diversità, dell'equità e dell'inclusione attraverso un percorso condiviso che generi valore.

Azioni

L'impegno del Politecnico verso la riduzione della propria impronta carbonica è stato consolidato nel tempo attraverso una serie di iniziative e passaggi istituzionali.

Action2040 e il piano di decarbonizzazione

Nel 2018, attraverso una valutazione preliminare dell'impronta ecologica dei campus, l'Ateneo ha iniziato a prendere consapevolezza del proprio impatto sull'ambiente, quantificando gli ettari virtuali necessari per supportare le proprie attività.

Nell'anno successivo, l'Ateneo ha deciso di firmare la **Climate Emergency Letter**, manifestando ufficialmente la volontà di intraprendere un percorso di decarbonizzazione e riduzione dell'impatto ambientale, con l'obiettivo di raggiungere la neutralità carbonica entro il 2040.

Queste analisi delle emissioni e considerazioni hanno portato all'individuazione delle prime azioni a breve termine, che includono il potenziamento degli impianti fotovoltaici dell'università, il completamento della sostituzione degli infissi, l'avanzamento del piano di ristrutturazio-

ne dei sistemi di illuminazione con l'utilizzo di LED, il potenziamento del monitoraggio ambientale degli spazi tramite l'installazione di nuovi sensori nelle strutture dell'ateneo e l'ottimizzazione dei sistemi termici ed elettrici.

Il piano di decarbonizzazione entro il 2040, ha l'ambizioso obiettivo di raggiungere emissioni zero con 10 anni di anticipo rispetto agli impegni "Net Zero" assunti a livello internazionale e rappresenta una sfida significativa per l'Ateneo. Questo richiede l'attuazione di azioni immediate e concrete nel breve termine, nonché l'implementazione di un piano pluriennale di decarbonizzazione per ridurre le emissioni di CO₂, sia dirette che indirette.

Inventario delle emissioni

Il Politecnico di Torino ha elaborato a partire dal 2022 il proprio inventario delle emissioni climatiche, seguendo le linee guida operative per gli inventari, specifico per le università, redatto dal RUS seguendo l'approccio del protocollo "GHG Protocol Corporate Accounting and Reporting Standard (2004)" redatto dalle RUS (vedi capitolo 1.6). L'in-

ventario analizza le tre dimensioni delle emissioni: dirette (ambito 1), indirette derivanti dall'energia acquistata e consumata (ambito 2) e tutte le altre emissioni indirette generate dall'Ateneo (ambito 3).

In particolare, nel primo esercizio di rilevazione, relativo all'anno 2021, sono state individuate e calcolate le seguenti dimensioni: Ambito 1: Emissioni del parco veicoli. Ambito 2: Emissioni derivanti dall'uso di energia elettrica e termica. Ambito 3: Emissioni legate alla mobilità del personale, alle missioni e ai viaggi, all'utilizzo di servizi cloud e alle forniture di ufficio.

/02

METODOLOGIA

2.1 MISURARE I PROGRESSI VERSO L'AGENDA 2030

Agenda 2030

Un efficace quadro di follow-up e revisione è fondamentale per garantire che la comunità internazionale sia sulla buona strada per raggiungere gli obiettivi di sviluppo sostenibile (SDG) e che gli obiettivi vengano attuati nella pratica. L'Agenda 2030 prevede un meccanismo basato sulla rendicontazione che copre tre livelli: nazionale, regionale e mondiale. A **livello globale**, l'esempio più importante di misurazione e monitoraggio SDGs è il database indicator gestito dalla United Nations Statistics Division (UNSD), l'esempio più significativo di reporting è la relazione annuale sui progressi pubblicata dal Segretario generale delle Nazioni Unite sugli obiettivi di sviluppo sostenibile. A **livello nazionale**, molti paesi hanno creato banche dati di indicatori SDG simili alla banca dati globale. L'equivalente nazionale della relazione sullo stato di avanzamento del Segretario generale è la e voluntary national review (VNR), una revisione dei progressi nazionali verso i goals compilata dai governi

nazionali e presentati alle Nazioni Unite. A **livello locale**, i comuni fanno sforzi per produrre revisioni sempre volontarie.

Nell'ambito dell'Unione Europea, Eurostat, l'Agenzia europea dell'ambiente DG Environment e il Joint Research Centre (JRC) sono le istituzioni che contribuiscono maggiormente al monitoraggio degli SDG (Trane et al., 2023).

Inoltre, l'Organisation for Economic Co-operation and Development (EOCD) dal 2016 stila il rapporto "Measuring Distance to SDG Targets", che raggruppa le tendenze dei vari paesi verso gli sforzi per gli SDGs. La relazione "Monitoring Report on Progress Towards the SDGs in an EU Context" è una pubblicazione annuale che si basa sul set di indicatori di sviluppo sostenibile dell'UE, costituito da 100 indicatori sviluppati in collaborazione con varie parti interessate, strutturati lungo i 17 obiettivi di sviluppo sostenibile.

Reporting a livello Nazionale

Le Voluntary National Reviews (VNR)

sono un meccanismo di segnalazione attraverso il quale i paesi presentano volontariamente i loro progressi verso l'attuazione degli obiettivi di sviluppo sostenibile (SDG) a livello nazionale.

Questi rapporti evidenziano i passi compiuti dal paese per integrare gli SDG nelle loro politiche, piani e programmi nazionali. I VNR coprono vari aspetti, tra cui quadri politici, disposizioni istituzionali, coinvolgimento delle parti interessate e progressi compiuti verso il raggiungimento di specifici obiettivi SDG.

Il processo di segnalazione è volontario e i paesi determinano le proprie tempistiche per l'invio dei VNR. La preparazione dei VNR comporta un approccio partecipativo e consultivo, coinvolgendo più parti interessate all'interno del paese. Le organizzazioni della società civile, il mondo accademico, gli enti del settore privato e altri attori pertinenti sono spesso coinvolti nel processo per garantire inclusività e prospettive diverse.

Le VNR forniscono preziose informazioni sulle sfide di attuazione affrontate dai paesi e aiutano a identifi-

care le aree in cui sono necessari ulteriori sostegni e risorse. Partecipando volontariamente al processo VNR, i paesi dimostrano il loro impegno per lo sviluppo sostenibile e la responsabilità nel raggiungimento degli SDG.

Durante il forum politico di alto livello del 2021, 42 paesi hanno presentato VNR, di cui otto dall'Europa. Tra questi, 24 paesi hanno presentato il loro secondo VNR, tra cui Cipro, Repubblica Ceca, Danimarca, Germania, Norvegia, Spagna e Svezia, mentre altri dieci paesi hanno presentato il loro terzo VNR. In totale, 247 VNR sono stati presentati, con circa il 90% degli Stati membri delle Nazioni Unite che hanno presentato almeno un VNR. Tra le pratiche degne di nota evidenziate dal "Repository of Good Practices in VR Reporting" figurano i rapporti completi della Finlandia nel 2020, incentrati sull'Agenda 2030.

Nel complesso, le revisioni nazionali volontarie svolgono un ruolo fondamentale nel promuovere la trasparenza, la responsabilità e la condivisione delle conoscenze tra i paesi, contribuendo in ultima analisi

allo sforzo collettivo per raggiungere l'Agenda 2030 e costruire un futuro più sostenibile per tutti.

Reporting a livello locale

Analogamente alle Voluntary National Review (VNR), condotte a livello nazionale, le Voluntary Local Review VLR mirano a promuovere la trasparenza, la responsabilità e la condivisione delle conoscenze. Quest'ultime consentono ai governi locali di valutare i loro contributi agli SDG, identificare le lacune e condividere le migliori pratiche con altre città e regioni (Trane et al., 2023). Il processo di conduzione dei VLR prevede che i governi locali preparino e inviino volontariamente rapporti sui loro sforzi di sviluppo sostenibile. Questi rapporti coprono in genere una vasta gamma di aree, come la pianificazione urbana, la sostenibilità ambientale, l'inclusione sociale, lo sviluppo economico e la governance. I VLR forniscono una panoramica completa del contesto locale, inclusi quadri politici, strategie, progetti e partenariati relativi agli SDG. Il processo di una revisione locale

volontaria può includere la raccolta e l'analisi dei dati, il coinvolgimento delle parti interessate locali e dei membri della comunità, la conduzione di valutazioni di vari indicatori di sostenibilità e la comunicazione dei risultati al pubblico. La revisione può aiutare a identificare i punti di forza, le sfide e le opportunità di miglioramento all'interno del contesto locale. Gli obiettivi di una Voluntary Local Review possono, dunque, variare a seconda degli obiettivi e delle priorità della comunità.

Nell'ambito dell'Unione Europea la piattaforma del Joint Research Center fornisce l'accesso alle informazioni sullo stato e sulle tendenze delle città e delle regioni, sulle strategie dell'UE a sostegno dello sviluppo urbano e territoriale e sulla localizzazione degli SDG e del livello di attuazione raggiunto, comprendendo diversi strumenti. Sebbene il concetto VLR non sia così ampiamente istituzionalizzato come il processo VNR, rappresenta un approccio di base per valutare gli sforzi di sostenibilità locale.

2.1.1 MONITORAGGIO NEI CAMPUS UNIVERSITARI

Il contributo degli HEIs alla definizione degli SDGs

In linea con la crescente importanza delle pratiche di reporting di sostenibilità all'interno dei centri universitari (Higher Educational Institutes), negli ultimi anni, la letteratura ha mostrato interesse per il ruolo degli obiettivi di sviluppo sostenibile Agenda 2030 e la rilevanza che hanno all'interno degli istituti di istruzione superiore (Filho, 2020).

Inoltre, l'Agenda 2030 ha riconosciuto l'istruzione come motore centrale del cambiamento, rendendo così il ruolo degli istituti di istruzione superiore fondamentale nel perseguimento dei suoi obiettivi.

Le università hanno la capacità di generare, tradurre e diffondere la conoscenza transdisciplinare per soddisfare gli SDGs coinvolgendo le discipline accademiche da un lato e le esigenze della società dall'altro. Le azioni necessarie per soddisfare i 17 Obiettivi richiedono dunque indicatori, ma anche l'identificazione di responsabilità specifiche, che

coinvolgono la gestione universitaria, le parti interessate universitarie e i responsabili politici (Barbera et al., 2021).

Gli indicatori

I programmi di sostenibilità universitari se misurati tramite un sistema di classifica globale diventano cruciali per capire l'entità dell'impatto ambientale e sociale a livello universitario. Il punteggio ottenuto esprime il raggiungimento di un obiettivo comune condiviso, rispondente alle esigenze della società che diventa un fattore motivante, una forza trainante per creare nuove iniziative, implementare, mantenere e innovare nuovi approcci di sostenibilità. Inoltre, una classifica della sostenibilità e delle green actions promuove la co-operazione sul panorama internazionale introducendo una sana competizione tra le istituzioni verso il miglioramento del mondo (Pearce, 2018). La partecipazione ai ranking è indispensabile per l'autovalutazione e l'introspezione e aiuta a identificare le lacune che devono essere ancora affrontate (Ascione et al., 2022).

Tra i ranking di sostenibilità più diffusi abbiamo: , THE Impact, Sustainability Tracking, Assessment and Rating System (STARS) e IU Green-Metric (Burmam et al., 2021).

The Impact Ranking

The Times Higher Education (THE) impact ranking è una classifica internazionale che redige ogni anno la classifica delle università mondiali, valutate in base a diversi indicatori di performance tra i quali insegnamento, ricerca, trasferimento di conoscenze e prospettive internazionali. Le classifiche prendono in considerazione anche altri fattori quali la reputazione accademica, la produzione e l'influenza della ricerca, il rapporto docenti-studenti, il reddito dell'industria e la diversità internazionale. Le classifiche forniscono indicazioni sulla posizione complessiva delle università su scala globale (Times Higher Education, 2021).

Viene introdotto per la prima volta nel 2019 con 450 università partecipanti, l'Impact Rankings è successivamente cresciuto di numero ogni anno e nel 202 ha incluso 1.118

università in rappresentanza di 94 paesi, tra cui il Politecnico di Torino.

Metodologia

THE-Impact Ranking segue una metodologia complessa che include la considerazione di numerose metriche e indicatori compositi per valutare e confrontare le università di tutto il mondo. Questi indicatori colgono diversi aspetti delle prestazioni universitarie in termini di insegnamento, ricerca, trasferimento di conoscenze e prospettive internazionali, misurando così il contributo delle università verso ciascuno dei 17 obiettivi (Ordorika et al., 2018). Il risultato finale consiste in un micro livello (punteggi per ogni SDG) e un macro-livello (creazione di un punteggio complessivo).

A livello micro, per ogni SDG, viene misurato il contributo dell'università rispetto a quattro aree: ricerca, insegnamento, gestione (università come custodi di risorse significative, comprese non solo le risorse fisiche ma anche le risorse umane), e sensibilizzazione (lavoro che le università intraprendono con le loro comunità locali, regionali, nazionali e internazionali) (Barron, 2017). Per fare

questo, un insieme di metriche è assegnato ad ogni SDG. Queste metriche sono raggruppate in tre diverse categorie (metriche di ricerca, metriche continue, metriche di evidenza) in base alla natura e allo scopo di ciascuna metrica. Mentre le metriche di ricerca sono derivate da un prodotto esterno (Scopus), quelle rimanenti (materiale continuo e probatorio) derivano da dati istituzionali forniti privatamente e direttamente dagli istituti di istruzione superiore all'editore di classifica.

Seguendo questo progetto, ogni SDG è organizzato in diversi gruppi di metriche. Il primo gruppo è sempre legato alle metriche di ricerca (27% del punteggio totale SDG).

Per ciascuno dei 17 obiettivi di sviluppo sostenibile, THE Impact crea diversi target misurabili progettati per interpretare i progressi di un'università verso un SDG individuale. Sia le informazioni quantitative che qualitative di input vengono usate per il calcolo, inclusi i dati forniti dall'università di riferimento e dai fornitori di dati di terze parti (Ragazzi, 2017).

Per essere inclusi nella classifica, le

università devono obbligatoriamente utilizzare SDG 17 (partnership for goals), considerato come l'obiettivo più importante a livello universitario. Oltre a queste prove, le facoltà partecipanti devono convalidare il loro contributo in almeno altri tre SDG da includere nella classifica generale. Il punteggio finale di un HEI viene calcolato aggiungendo il punteggio di SDG 17 che è obbligatorio, insieme ai tre punteggi dei restanti SDG. Considerando la classifica generale, il 22 per cento del punteggio è associato all'SDG 17, mentre gli altri, che sono variabili, rappresentano il 26 per cento ciascuno. Al fine di ottenere la classifica generale, la scala per tutti gli Obiettivi è compresa tra 0 a 100 per essere poi ponderata per la classifica finale. Ci sono tre insiemi di metriche all'interno di ogni SDG che sono considerati durante la valutazione (Caputo et al., 2021), (Times Higher Education Ranking methodology, 2021).

Il Politecnico

Nel 2020, il Politecnico di Torino (PoliTO) si è posizionato al 17° posto su oltre 470 università interna-

zionali per l'Obiettivo di Sviluppo Sostenibile (SDG) 11, relativo a "Città e comunità sostenibili". Inoltre, si è classificato all'88° posto su oltre 377 università per l'SDG 13, che riguarda il "Cambiamento climatico". Nel 2021, il PoliTO è stato incluso nella top 100 per l'Obiettivo di Sviluppo Sostenibile 9, che si focalizza su "Imprese, Innovazione e Infrastrutture". Questa classifica comprendeva quasi 800 università, e il PoliTO ha ottenuto il punteggio massimo per la ricerca sull'industria, l'innovazione e le infrastrutture. Inoltre, è stato riconosciuto per il numero di brevetti che citano ricerche universitarie e per il numero di spin-off creati sulla base delle sue attività di ricerca. (Politecnico di Torino, 2022).

Green Metric UI

Il UI Green Metric ranking è stato il primo ranking a livello mondiale ad occuparsi delle tematiche sulla sostenibilità lanciato nel 2010 dalle università dell'Indonesia (Atici et al., 2021). Il livello associato a ciascun campus universitario è integrato nella piattaforma UI Green Metric World University Ranking, che è

uno strumento online che permette di caricare i dati direttamente dalle università, secondo le principali categorie definite nell'indice GM. In particolare, l'indice UI Green Metric, considera morfologia urbana, politiche di sostenibilità (energia, trasporti, rifiuti, acqua) e programmi accademici. A partire da questi dati, i risultati sono raccolti direttamente dalle informazioni online fornite da università e verificate; infine, la piattaforma GM fornisce una classifica che permette di confrontare la sostenibilità delle varie Università (Ali et al., 2021).

Dal 2016 l'indice GM è stato organizzato in sei categorie principali. Queste categorie e i loro pesi sono: Setting and Infrastructure (15%), Energy and Climate Change (21%), Waste (18%), Water (10%), Transportation (18%) e Education (18%). Ciascuno delle sei categorie principali è definita da diversi indicatori che permettono di descrivere lo specifici fattori in termini di sostenibilità (Suwartha, 2019).

Il punteggio è rappresentato da una semplice somma di elementi (o risposte su una scala) e può esse-

re elaborato anche statisticamente. Inoltre, punteggi grezzi sono ponderati per il calcolo del punteggio finale.

I criteri tenuti in considerazione includono la raccolta di informazioni di base delle dimensioni dell'università e il suo profilo di zonizzazione, sia esso urbano, suburbano, o rurale. In aggiunta vengono considerati il grado di spazio verde, il consumo di energia elettrica e la sua impronta di carbonio. Seguono poi i dati relativi ai trasporti, all'uso dell'acqua, alla gestione dei rifiuti, all'energia, all'istruzione ed alla ricerca.

I criteri sono i seguenti:

- Setting and Infrastructure (SI) (15%)
- Energy and Climate Change (EC) (21%)
- Waste (WS) (18%)
- Water (WR) (10%)
- Transportation (TR) (18%)

Il Politecnico

Il Politecnico di Torino si conferma uno degli atenei più sostenibili in Italia e nel mondo. Lo affermano i risultati del GreenMetric World University Rankings, che mette a con-

fronto le università valutandone la sostenibilità ambientale e sociale. Il Politecnico di Torino è presente nelle classifiche di UI GreenMetric dal 2012 e ha costantemente migliorato la sua posizione, in particolare a partire dal 2016, quando è stato istituito il Green Team. Inizialmente classificato al 333° posto, il PoliTO è salito al 142° posto. Nel 2020 ha raggiunto il 25° posto a livello mondiale e, a partire dal 2021, si è posizionato tra i primi 20 atenei sostenibili su oltre 900 partecipanti, nonché al secondo posto tra le università italiane (Politecnico di Torino, 2023).

2.2 CITTÀ, MICROCLIMA E CONTRIBUTO AGLI SDGS

Nel contesto dell'Agenda 2030, l'utilizzo di strumenti di modellazione climatica e del microclima può essere di grande aiuto nel valutare i progressi verso il raggiungimento degli SDGs. Questi strumenti possono colmare le lacune di dati a livello urbano, consentendo di simulare ed analizzare gli effetti degli interventi sistematici. (Trane et al., 2023).

Questi modelli climatici consentono di valutare le concentrazioni di inquinanti atmosferici e i risultati di interventi di adattamento e mitigazione che riguardano la riduzione del rischio di catastrofi, l'adozione di piani di adattamento a livello nazionale e la comunicazione dei rischi derivanti dai pericoli climatici. La simulazione climatica può essere uno strumento utile per valutare i progressi verso gli obiettivi dell'Agenda 2030. Ci sono diversi modelli di simulazione climatica disponibili, ma in generale questi vengono utilizzati per prevedere il comportamento del clima futuro sulla base di vari scenari di input. Gli strumenti di modellazione climatica possono svolgere un ruolo nella misurazione dei pro-

gressi verso gli obiettivi di sviluppo sostenibile (SDG), fornendo dati sugli effetti degli interventi ex ante ed ex post.

Vengono tenuti in considerazione gli SDGs strettamente correlati al cambiamento climatico e qualità dell'aria dei centri urbani.

In particolare, questi strumenti possono aiutare a valutare gli indicatori relativi all'inquinamento atmosferico e alla mitigazione degli effetti negativi del cambiamento climatico. La riprogettazione dello spazio pubblico per mitigare il microclima urbano può aiutare il raggiungimento l'obiettivo **SDG 7.3** di raddoppiare il tasso globale di miglioramento dell'efficienza energetica entro il 2030. Ciò si verifica poiché la riduzione delle temperature esterne può diminuire la domanda di energia degli edifici. Inoltre, questa iniziativa potrebbe avere impatti positivi anche su altri SDG, tra cui **9.1, 9.a, 11.3, 11.5, 11.6, 11.a, 11.b, 12.2, 12.8, 13.3, 13.b e 15.9** (Figura 2.2.1), (Trane et al., 2023).

Le simulazioni ambientali sono ba-

sate su un modello informatico del sistema climatico terrestre e possono essere condotte a più scale e riprodurre sia il clima passato che predire il clima futuro. I modelli climatici calcolano molte proprietà diverse del clima, tra cui temperatura atmosferica, pressione, vento e umidità. I modelli calcolano queste proprietà per migliaia e migliaia di punti diversi su una griglia tridimensionale. Le simulazioni climatiche sono modelli basati su computer che consentono agli scienziati di studiare gli effetti dei cambiamenti climatici sull'ambiente. Le simulazioni possono essere utilizzate per prevedere le condizioni climatiche future e aiutare a prendere decisioni politiche su come affrontare il riscaldamento globale (Tsoka et al., 2020).

Le simulazioni climatiche forniscono ai ricercatori l'opportunità di capire in che modo diversi fattori, come le emissioni di gas serra, influenzino il sistema climatico. Possono anche essere utilizzati per valutare i potenziali impatti delle attività umane sul clima globale e aiutare a prendere decisioni informate su come ridurre tali impatti. Studiando le simulazio-

ni climatiche, gli scienziati possono ottenere una migliore predittività di come il clima della Terra risponderà ai vari cambiamenti nell'ambiente e sviluppare strategie per la gestione e l'adattamento a tali cambiamenti. Perché simulare i modelli climatici?

I modelli climatici aiutano gli scienziati a testare la loro comprensione del nostro sistema climatico e a prevedere i cambiamenti futuri del nostro clima o a capire le conseguenze che le nostre azioni ed interventi possono avere. **I modelli indagano dunque il grado in cui i cambiamenti climatici osservati possono essere dovuti alla variabilità naturale, all'attività umana o a una combinazione di entrambi.** I loro risultati e proiezioni forniscono informazioni essenziali per prendere decisioni consapevoli di importanza nazionale, regionale e locale, come la gestione delle risorse idriche, l'agricoltura, i trasporti e la pianificazione urbana.

Attraverso le simulazioni è quindi possibile stabilire se gli interventi pensati e realizzati abbiano avuto un riscontro positivo e dunque se

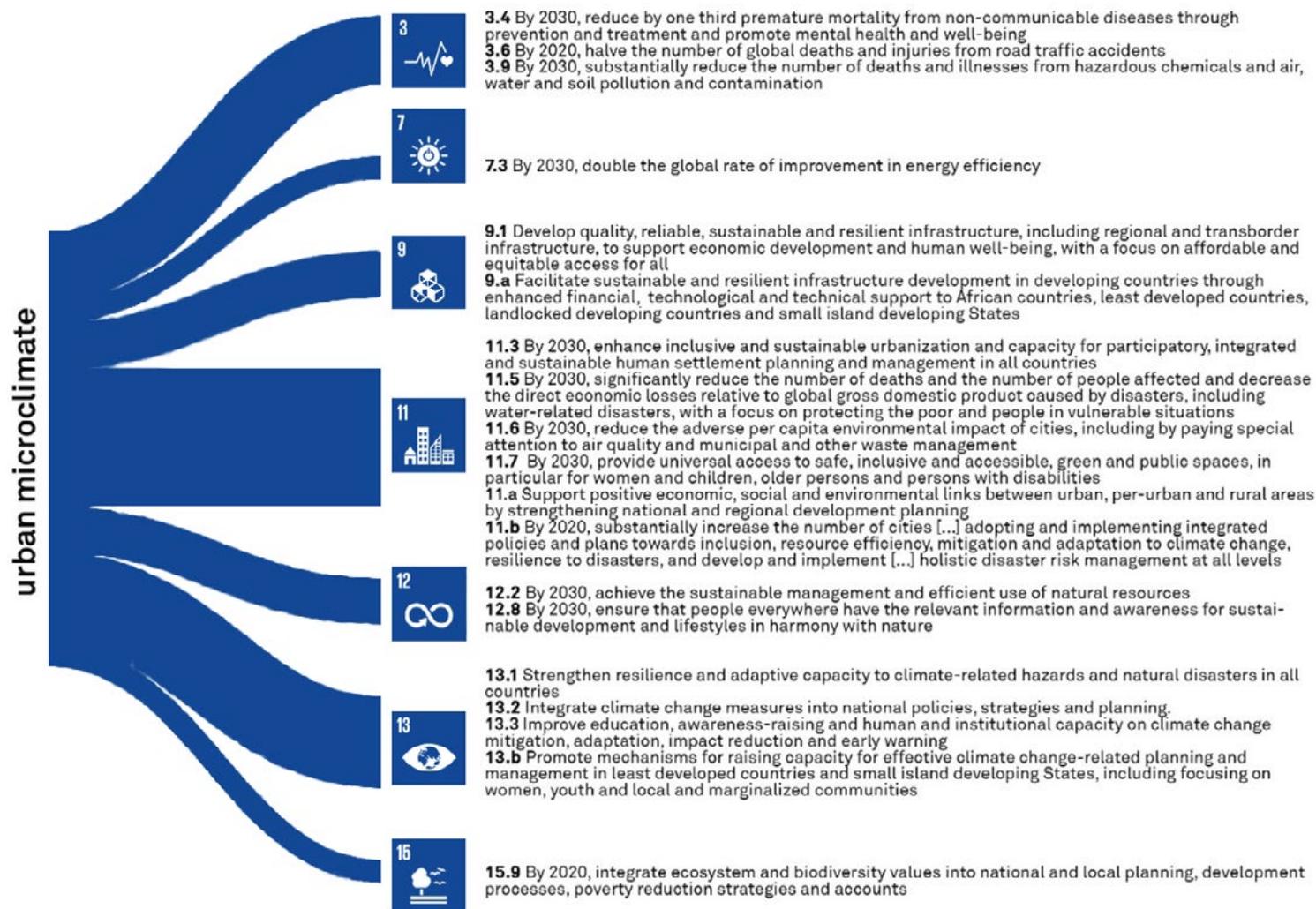


Figura 2.2.1: Collegamento tra la mitigazione delle UHI e i target degli SDGs. Fonte: Trane, Giovanardi, Pejovic e Pollo, 2023

abbiano portato ad uno sviluppo sostenibile, riscontrabile attraverso classifiche che tengono conto degli avanzamenti verso i traguardi dell'Agenda 2030.

Strumenti per gli indicatori

Gli strumenti di modellizzazione del clima e del microclima possono aiutare a misurare i progressi verso il raggiungimento degli SDG, colmare la mancanza di dati a scala intra-urbana mediante la simulazione e ad analizzare gli effetti delle politiche e dei progetti ex-ante e ex-post (Trane, 2023). In particolare i modelli climatici possono fornire un forte supporto agli indicatori 3.9.1 ("Tasso di mortalità attribuibile all'inquinamento domestico e ambientale dell'aria") e 11.6.2 ("Livelli medi annuali di particolato sottile, come PM_{2,5} e PM₁₀, nelle città"), per quanto riguarda le simulazioni climatiche in grado di valutare la concentrazione di inquinamento dell'aria. Tuttavia, il maggiore contributo degli approcci di modellazione del clima è legato agli indicatori del **SGD 13**, che possono beneficiare dell'impiego di

approcci quando si tratta di valutare le politiche nazionali e locali per la mitigazione del rischio di catastrofi, l'adozione di piani nazionali di adattamento e la comunicazione dei rischi derivanti dai pericoli climatici (rispettivamente, gli indicatori 13.1.2, 13.1.3, 13.2.1, 13.3.1). Considerando SDG 11, i modelli climatici sono anche centrali nel contribuire alla misura degli obiettivi 11.7.1 ("Quota media dell'area edificata delle città che è spazio aperto ad uso pubblico per tutti, suddiviso per sesso, età e persone con disabilità"), 11.a.1 ("Sostenere legami economici, sociali e ambientali positivi tra aree urbane, periurbane e rurali, rafforzando la pianificazione dello sviluppo nazionale e regionale."). Contribuiscono inoltre sia all'indice 11.b.1 ("Numero di paesi che adottano e attuano strategie nazionali di riduzione del rischio di disastri in linea con il quadro di Sendai per la riduzione del rischio di disastri 2015-2030") che 11.b.2 ("Percentuale di governi locali che adottano e attuano strategie locali di riduzione del rischio di disastri in linea con le strategie nazionali

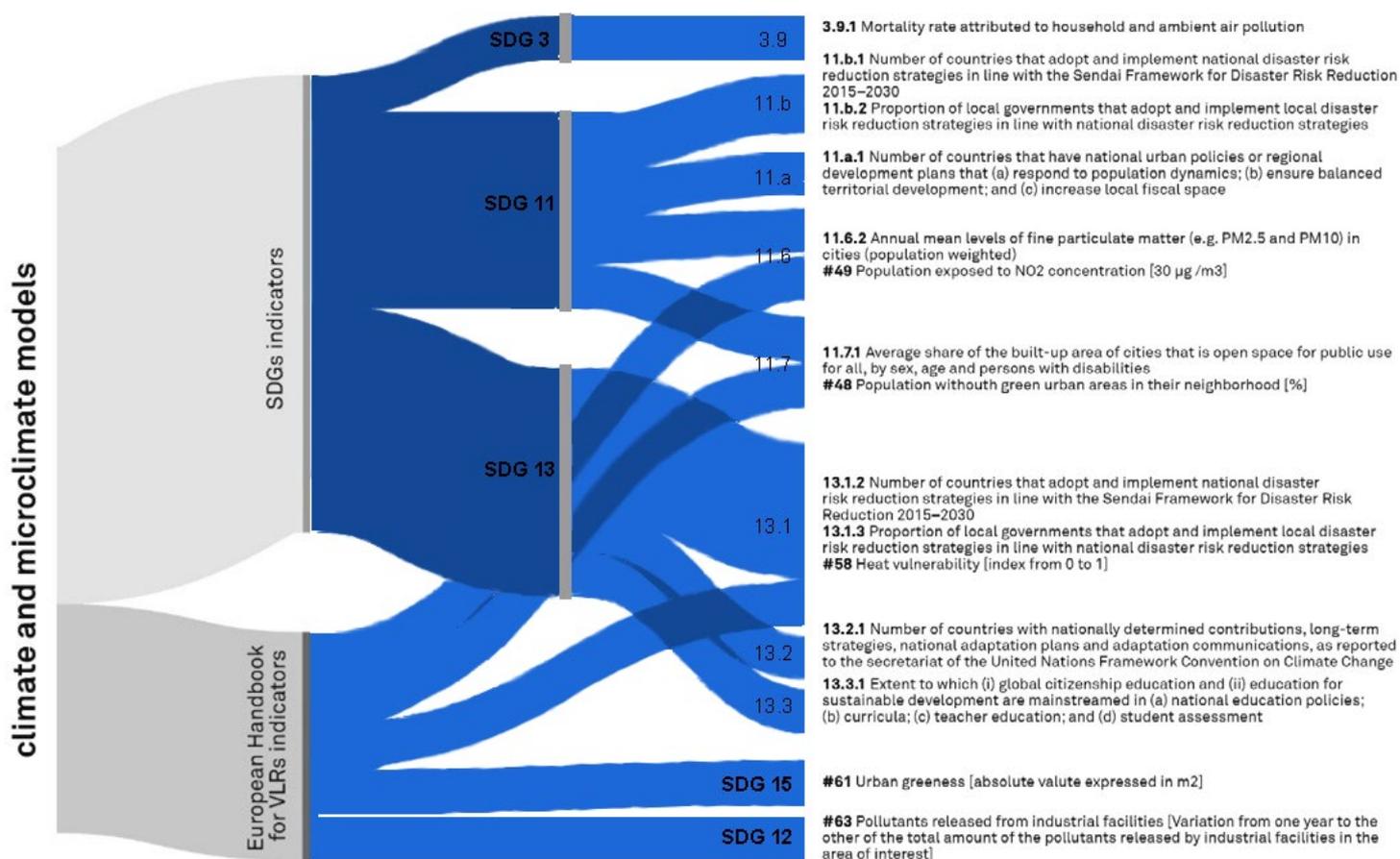


Figura 2.2.2: Modelli microclimatici e supporto alla misurazione degli indicatori degli SDGs. Fonte: Trane, Giovanardi, Pejovic e Pollo, 2023

La simulazione del microclima è una tecnologia che è stata sviluppata per replicare accuratamente le condizioni di un ambiente specifico. Questa tecnologia ha rivoluzionato il modo in cui scienziati e ricercatori possono studiare il cambiamento climatico e i suoi effetti su diversi ecosistemi. Il termine "microclima" si riferisce alle condizioni climatiche che esistono in un'area molto piccola e può quindi essere declinata nei confini di un campus universitario. I microclimi, affrontati più dettagliatamente nel capitolo successivo, possono essere influenzati da molti fattori, tra cui la topografia, il tipo di suolo, dalla copertura vegetale e dalla presenza di eventuali fonti di inquinamento atmosferico, come strade ad alto scorrimento o industrie.

La simulazione del microclima utilizza modelli computerizzati per simulare il clima di una particolare area. Incorporando i dati delle stazioni meteorologiche locali e di altre fonti, questi modelli possono riprodurre accuratamente la temperatura, le precipitazioni, l'umidità, la velocità del vento e la direzione di un dato

microclima. Ciò consente ai ricercatori di osservare come diverse variabili interagiscono tra loro per creare modelli unici in ecosistemi specifici (Erell, 2011).

Tipologie di modelli climatici

I **modelli in scala** sono stati utilizzati per studiare una serie di fenomeni relativi agli ambienti urbani, inclusi modelli di flusso, turbolenza e dispersione di inquinanti. Questi studi sono stati condotti nelle gallerie del vento e nei serbatoi d'acqua, oltre che all'aperto ed hanno fornito preziose informazioni sul funzionamento dell'atmosfera urbana. Inoltre, i modelli in scala sono stati usati per sviluppare modelli di fluidodinamica computazionale (CFD), che possono essere usati per simulare ambienti urbani su una gamma di scale. Tuttavia, uno dei limiti dell'utilizzo dei modelli in scala è che, a causa delle loro dimensioni, possono essere utilizzati solo per studiare un ventaglio limitato di fenomeni.

I **modelli statistici** possono essere utilizzati per stimare gli effetti delle città sul clima. Hanno diversi

vantaggi, come la produzione di risultati realistici, richiedono risorse computazionali basse e sono in grado di utilizzare dati da più posizioni. Tuttavia, alcuni modelli statistici presentano anche degli svantaggi, come la necessità di lunghi periodi di osservazione, la mancanza di basi fisiche e la necessità di dati provenienti da molte località diverse. I modelli statistici vengono spesso utilizzati per studiare l'effetto Urban Heat Island (UHI) e la maggior parte di essi sono semplici regressioni lineari. I modelli statistici più avanzati utilizzano l'analisi spettrale, gli autovettori o le reti neurali per prevedere i rischi correlati all'UHI. Questi rapporti statistici possono anche essere utilizzati per valutare l'evoluzione normalizzata dell'UHI, consentendo previsioni rapide delle temperature della città e aiutando a prevedere le condizioni climatiche future.

I **modelli numerici** consentono la simulazione 3D di ambienti termici urbani al fine di valutare le interazioni tra superfici (verticali e orizzontali), radiazione solare e vento. Si occupano principalmente

di equazioni di governo del flusso. Sono in grado di fornire informazioni su qualsiasi parametro valutato in tutti i punti del dominio computazionale e condurre analisi comparative basate su diversi scenari. Vengono utilizzati metodi numerici per prevedere gli impatti di diversi microclimi e opzioni di progettazione sull'ambiente urbano. Gli approcci di simulazione numerica più utilizzati sono Energy Balance Model (EBM) e CFD. Tra i modelli basati sulla fluidodinamica, i software più utilizzati impiegati sono: Envi - met, utilizzato anche per questa ricerca, SOLENE Microclimat, UMEP & Solweig, Rayman e Ladybug (Trane et al., 2021).

2.2.1 LA SIMULAZIONE DEL MICROCLIMA E DEL COMFORT

La simulazione attraverso software del microclima e del comfort termico è un'area di ricerca sempre più importante nei campi dell'architettura sostenibile e dell'ingegneria civile. Questo tipo di simulazioni sono strumenti preziosi utilizzati per comprendere e analizzare le condizioni termiche di una specifica area o ambiente, attraverso l'uso di modelli computazionali e algoritmi per prevedere e valutare vari aspetti legati al microclima e al comfort termico.

Simulazione del microclima: le simulazioni del microclima si concentrano sullo studio delle condizioni atmosferiche su piccola scala all'interno di un'area localizzata, come un edificio, una strada urbana, uno spazio esterno o una porzione di un quartiere. Esse prendono in considerazione fattori come la radiazione solare, i modelli del vento, la temperatura dell'aria, temperature superficiali, l'umidità, la dispersione di inquinanti

atmosferici e i meccanismi di trasferimento del calore. Utilizzando modelli numerici, il software di simulazione può analizzare le interazioni tra queste variabili e fornire informazioni dettagliate sulle condizioni microclimatiche in una località specifica.

Simulazione del comfort termico: le simulazioni del comfort termico mirano a valutare e prevedere la percezione termica e il comfort umano in diversi ambienti. Prendono in considerazione fattori come la temperatura e la velocità dell'aria, l'umidità, l'isolamento degli indumenti e la generazione di calore metabolico. Integrando questi parametri in modelli computazionali, le simulazioni possono stimare indici di comfort termico, come Predicted Mean Vote (PMV), Universal Thermal Climate Index (UTCI) o Physiological Equivalent Temperature (PET), che indicano il livello di comfort degli occupanti.

2.3 LA SCALA DELLA SIMULAZIONE

La scala dimensionale della simulazione del microclima si riferisce alla sua capacità di simulare interi sistemi fisici, piuttosto che singoli elementi. Concentrandosi su interi sistemi, tali simulazioni possono fornire informazioni molto più dettagliate su come il cambiamento climatico influisce su interi ecosistemi sia a breve che a lungo termine. Questo livello di dettaglio è fondamentale quando si tratta di capire in che modo i cambiamenti in una parte di un ecosistema possono influenzare altre parti in modi imprevedibili.

Generalmente, il microclima urbano, ovvero il clima che ricorre maggiormente alla microscaletta, è riferito a quelle condizioni climatiche che caratterizzano una determinata zona all'interno di una più ampia area urbana. Questo si traduce spesso in simulazioni di aree pressoché intorno ad 1 km², nella quale insistono determinate caratteristiche microclimatiche, influenzate dalla qualità dello spazio costruito e non dell'istituzione universitaria e del suo immediato intorno. Esistono diversi tipi di strumenti di analisi del clima e del microclima, generalmen-

te classificabili in base alla scala di applicazione e risoluzione. Ad esempio, i fenomeni legati al clima urbano sono stati classificati in modelli alla mesoscaletta e alla microscaletta. La scala meso rappresenta una regione o una città, la scala locale corrisponde a un quartiere o distretto, mentre quella micro raggiunge i 2000 m e include canyon stradali e singoli edifici (Elbondira, 2021).

Meso scala

I modelli climatici alla **meso scala** si concentrano sui fenomeni su larga scala piuttosto che su quelli a livello stradale. Questi modelli hanno solitamente una dimensione di poche decine di chilometri, con una griglia fino a 100 o 200 chilometri su scala regionale. La risoluzione spaziale è solitamente di 100 o 200 metri. Molte organizzazioni hanno sviluppato i propri modelli dal 1970, incluso il National Center for Atmospheric Research (NCAR) e la Pennsylvania State University (Lobaccaro, 2019). La ricerca sul clima alla meso scala viene svolta principalmente attraverso l'uso di dati di telerilevamento e immagini satellitari per derivare la temperatu-

ra della superficie terrestre (LST), che viene utilizzata per modellare l'UHI (Oke, 2006), supportata da dati meteorologici provenienti da stazioni urbane. Altri studi su mesoscala utilizzano modelli numerici, come il Weather Research and Forecast (WRF) Model (Elbondira, 2021), progettato per "sistemi numerici di previsione meteorologica che, sia per la ricerca atmosferica che per la previsione operativa, devono analizzare l'impatto dei fenomeni climatici sulla città" (Lobaccaro, 2019).

Micro scala

La ricerca sul microclima a livello urbano viene svolta principalmente utilizzando modelli su **microscala** come Urban Canopy Models (UCM) o Computational Fluid Dynamics (CFD). Queste simulazioni sono per lo più basate su un'area compresa tra 200 metri e 2 chilometri e sono comunemente utilizzate per valutare gli impatti delle misure di mitigazione sull'ambiente termico a scala urbana (come il rapporto tra la forma e la disposizione degli edifici o degli isolati, l'ambiente termico urbano locale, la disposizione e la progettazione dei corridoi di ven-

tilazione) e la loro influenza sull'ambiente termico e gli indici di comfort termico (Chen et al., 2022). Modellazione e simulazioni matematiche sono principalmente combinate poi con misurazioni sul campo per valutare gli effetti dell'ambiente urbano sul microclima e sul comfort termico (Trane et al., 2021).

2.4 STRATEGIE DI ADATTAMENTO E MITIGAZIONE DELLE UHI

Al fine di affrontare gli effetti del riscaldamento globale e del fenomeno delle isole di calore urbane (UHI), sono state studiate varie strategie di mitigazione del microclima attraverso la ricerca, la modellazione e l'implementazione pratica. Tuttavia, a causa delle diverse condizioni microclimatiche di ciascun sito, non è possibile garantire che un approccio sia efficace nel migliorare l'ambiente in ogni circostanza. Di conseguenza, analisi e simulazioni devono essere impiegate per informare sulle strategie più adatte ad ogni singolo caso (Wise et al., 2014).

Le strategie di mitigazione del clima, come già detto, **sono quelle che cercano di ridurre le emissioni di gas serra e quindi ridurre il tasso di riscaldamento globale**. Gli esempi includono la riduzione del consumo energetico, l'aumento dell'efficienza energetica, il passaggio a fonti energetiche rinnovabili, il miglioramento delle pratiche agricole e la riduzione della deforestazione. Queste strategie mirano

a rallentare o addirittura a invertire gli effetti del cambiamento climatico riducendo le emissioni che lo provocano.

Le strategie di adattamento, invece, **sono quelle che aiutano a preparare le comunità agli impatti dei cambiamenti climatici che già si manifestano** (Kleerekoper, 2016). Queste politiche possono includere cambiamenti nei modelli di utilizzo del suolo, nei sistemi di gestione dell'acqua, nella selezione delle colture e nelle pratiche agricole, nei regolamenti edilizi per le aree soggette a inondazioni, nelle polizze assicurative per i disastri naturali, ecc. Esse sono progettate per aiutare gli individui e le comunità a diventare più resilienti di fronte a un ambiente in evoluzione, preparandoli ai potenziali rischi associati a eventi meteorologici estremi (Ludeña, 2015).

In particolare questa ricerca approfondisce le strategie di adattamento e mitigazione relative all'isola di calore urbana applicabili in contesto urbano e pertanto indicate anche

per le università. Vengono di seguito riportate.

Strategie Vegetazione

La vegetazione raffredda l'ambiente per evaporazione e traspirazione e per ombreggiamento limitando l'assorbimento della radiazione da parte delle superfici. La sua capacità di raffreddamento medio sulla temperatura dell'aria è di 1 - 6°C (Ludeña, 2015) ed esistono diversi tipi di applicazione della vegetazione nelle aree urbane: foreste urbane (parchi), alberi stradali, prati, verde privato nei giardini e tetti o facciate verdi (Kleerekoper, 2016).

Verde ad alto fusto

La piantumazione di alberi lungo le strade, nelle piazze e negli spazi collettivi delle città, ha un notevole beneficio sul microclima urbano, garantendo maggiori zone d'ombra sui marciapiedi o nella creazione di spazi per la sosta, diminuendo il carico termico sulle superfici pavimentate e sulle facciate degli edifici e agendo sul controllo delle brezze estive. Per quanto riguarda l'inquinamento gli alberi, come tutte i tipi di vegetazione, sono in grado di fil-

trare e pulire l'aria (Ludeña, 2015).

Verde basso

L'inserimento di aiuole lungo le strade, nelle piazze e negli spazi collettivi delle città oltre ad avere un impatto elevato sul controllo del microclima urbano, attraverso l'abbassamento delle temperature superficiali, hanno la duplice funzione di raccogliere l'acqua piovana in eccesso durante le piogge intense, evitando il dilavamento eccessivo.

Arbusti e siepi disposte ai lati delle strade sono in grado di schermare i marciapiedi dal particolato generato dal passaggio delle auto, non costituendo al tempo stesso un vincolo per la ventilazione naturale del canyon stradale (Yang et al., 2021).

Tetti e facciate verdi

Le pareti e i tetti verdi possono offrire una serie di vantaggi agli edifici, tra cui una migliore qualità dell'aria, una riduzione dei rumori e una protezione termica. Il vantaggio più significativo è tuttavia la riduzione del consumo energetico per il raffreddamento dell'edificio durante la stagione calda. Esistono diverse tipologie di pareti verdi, che possono essere

costituite da una struttura portante per piante rampicanti oppure composte da vasi direttamente appoggiati a terra (Cartel et al., 2015). Un tetto verde è, invece, un modo per rendere questi spazi protagonisti attivi nel contrasto all'inquinamento e alle temperature elevate della città (Cartel et al., 2015).

Coperture e strade-cool (alta albedo)

Verniciare le coperture degli edifici di bianco è strategia a bassissimo costo che riduce il consumo di energia degli edifici durante il periodo estivo. Colorando le coperture con vernici chiare che riflettono i raggi solari o coprendole con materiali bianchi, tipo ghiaia, il carico termico dato può essere decisamente diminuito. I tetti bianchi riflettono oltre il 90% (Kottner et al., 2018) della luce che ricevono, riducendo i consumi degli edifici (Kottner et al., 2018).

Lo stesso trattamento può essere riservato alle superfici orizzontali (Figura 2.4.1) ad altezza del suolo, l'asfalto può essere dipinto con vernici chiare (appositamente pensate ad evitare l'abbagliamento)

che riducono notevolmente il calore assorbito dalla strada, in alternativa preferire per le superfici impermeabili materiali lapidei chiari (Kottner et al., 2018).

Superfici permeabili

Le pavimentazioni permeabili permettono all'acqua, all'aria e al vapore acqueo di filtrare attraverso. Grazie poi al rilascio nel tempo di acqua per evaporazione nell'ambiente, è possibile abbassare le temperature dell'aria. Esempi di questo tipo sono l'asfalto e il cemento permeabile, pavimenti posati a giunto aperto, grigliati, ghiaie, aggregati naturali e terreni stabilizzati (compattati). Alcuni di questi tipi di pavimentazione possono contenere vegetazione (tipo il green parking) o essere disposti in modo che il giunto si inerbisca. Ampi vuoti tra le pavimentazioni possono limitare l'assorbimento del calore al terreno sottostante, conservandolo al livello superficiale e riducendo il rilascio nelle ore notturne (Cartel et al., 2015).

Acqua

L'acqua raffredda l'aria tramite i processi di evaporazione, assorbendo

calore (quando c'è una grande massa d'acqua, che funge da tampone di calore) o trasportando il calore tramite lo scorrimento (come nei fiumi). Le applicazioni dell'acqua in generale sono più efficaci quando hanno una grande superficie oppure quando l'acqua scorre o si disperde, come da una fontana (Kleerekoper, 2016).

L'utilizzo di acqua in ambiente urbano attraverso l'inserimento di specchi d'acqua, fontane, cascate e acqua nebulizzata può rappresentare un'utile strategia per abbassare le temperature estive e aumentare la sensazione di comfort nello spazio urbano. L'integrazione dell'acqua nello spazio pubblico può fornire una gamma di benefici, compreso creare spazi dedicati al gioco e ad attività ricreative negli spazi urbani. Tuttavia, bisogna sottolineare che l'uso dell'acqua comporta un consumo costante di energia (tranne del caso di stagno) e di approvvigionamento idrico per il suo mantenimento.

Superfici riflettenti

L'aumento della riflettanza solare riduce l'assorbimento della radiazione solare nell'ambiente urbano,

consentendo così di ottenere, attraverso l'uso di materiali ad alta riflettanza solare (alta albedo), superfici più fresche. Questi materiali possono essere utilizzati sulle facciate degli edifici sui tetti e come pavimentazione per strade e marciapiedi. Il loro utilizzo consente di diminuire la temperatura superficiale delle aree urbane e riduce al minimo il corrispondente rilascio di calore sensibile nell'atmosfera (Akbari, & Kolokotsa, 2016).

Coperture urbane

Elementi di copertura opachi impediscono il passaggio di radiazione solare al suolo aumentando la superficie ombreggiata e riducendo il carico termico sulle superfici e a seconda delle caratteristiche sia fisiche, sia dimensionali degli elementi di ombreggiatura, è possibile ottenere risultati differenti in termini di benessere percepito. Le coperture devono essere di colore chiaro in modo da presentare alti valori di riflettanza solare e l'altezza deve essere tale da permettere la dissipazione del calore (Kottner et al., 2018).

1. Figura 2.4.1 Copertura verniciata di bianco di un grande supermercato a Las Vegas negli Stati Uniti. Fonte: <https://www.nationalgeographic.com/environment/article/climate-change-white-roofs-and-common-sense>

Figura 2.4.1



2.5 IL MICROCLIMA

«Il microclima viene definito come il clima che prevale alla microscala»

«Il termine microclima urbano si riferisce, invece, alle condizioni climatiche in un'area urbana che differisce dal clima delle sue zone rurali»

Il microclima viene definito come il clima che prevale alla scala locale (Erell et al., 2021). Per scala locale si intende, nei contesti geografici, uno spazio caratterizzato da specifiche dimensioni e condizioni atmosferiche. Il range spaziale, tuttavia, è variabile in quanto la portata dei vari fenomeni atmosferici cambia a seconda delle specificità dello spazio in questione. In genere si parla di micro-scala considerando un range spaziale compreso **tra 200 m fino a 2 km**. Il microclima è quindi «qualsiasi condizione climatica in una zona relativamente piccola, a pochi metri sopra la superficie terrestre con determinate caratteristiche atmosferiche» (Erell, 2011).

Microclima urbano

Il microclima è dunque il modello che include le variazioni in termini di precipitazione, temperatura, umidità, sole, velocità del vento e altre misure meteorologiche che si verificano alla microscala per lunghi periodi di tempo. Il termine microclima urbano si riferisce, invece, alle condizioni climatiche in un'area urbana che differisce dal clima delle

sue zone rurali in quanto influenzate in modo consistente dall'ambiente costruito, in particolare dalle caratteristiche delle superfici e dalle attività antropiche che si svolgono negli insediamenti urbani. Diversi aspetti climatici, quali le condizioni climatiche, le variazioni stagionali e i cambiamenti climatici, comportano crescenti esigenze di pianificazione e progettazione di sviluppi urbani. Una **città assorbe e trattiene significativamente più calore rispetto alle aree rurali** (Oke, 1989) ed è ciò la causa delle isole di calore urbano. Come suggerito dall'UNEP¹, le città devono essere in grado di adattarsi al futuro microclima urbano, che implica non solo un aumento del consumo di energia da parte degli edifici, ma anche un effetto diretto sul comfort clima umano nelle aree urbane.

Elementi del clima urbano

Secondo Oke (1989) la componente dell'atmosfera sopra i centri abitati è suddivisa in due livelli che classificano le anomalie termiche dei contesti antropizzati. Lo strato

1. UNEP, United Nations Environment Programme, è l'autorità globale che definisce l'agenda ambientale, promuovendo l'attuazione dei programmi ambientali dello sviluppo sostenibile. Fonte: <https://www.unep.org/>

di confine urbano (Urban Boundary Layer) e lo strato di transito urbano (Urban Canopy Layer) (Figura 3.1.1). La parte di UBL si riferisce

alla porzione di strato atmosferico superiore, le cui caratteristiche sono influenzate dall'area urbana al suo limite inferiore.

«L'UCL è lo strato d'aria intrappolato tra elementi di asperità urbani come gli edifici, dove il clima è influenzato dai materiali e dalla geometria dell'area circostante e dalle attività umane»

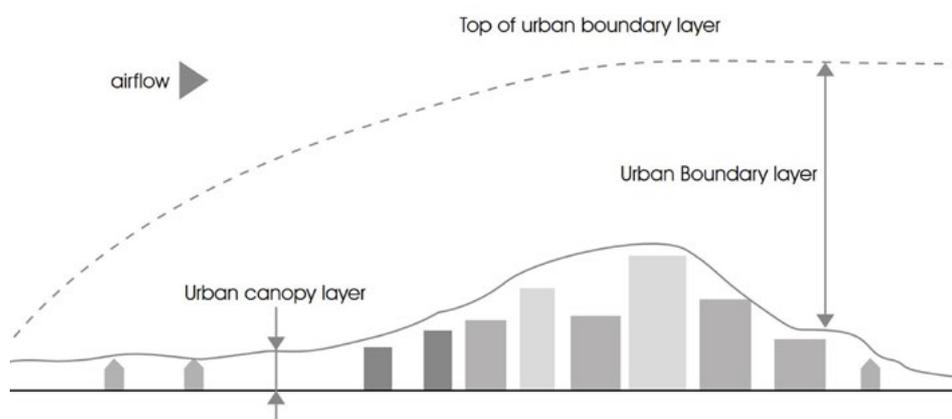


Figura 2.5.1 - Schema illustrativo della classificazione dei due livelli termici (Eltonouby, 2019).
(a) mesoscala

L'UCL è invece lo strato d'aria intrappolato tra elementi di asperità urbani come gli edifici, dove il clima è influenzato dai materiali e dalla geometria dell'area circostante.

L'atmosfera all'interno del UBL è influenzata dalla presenza della superficie urbana, ma non vi si adatta del tutto, le proprietà di questo strato non sono influenzate da singoli elementi urbani come singoli edifici e strade ma dalla trama della superficie urbana

ed è solo all'interno di questo strato che avviene lo scambio verticale di energia tra la città e l'atmosfera.

Oltre agli strati, l'atmosfera urbana può essere rappresentata anche da tre scale principali (Oke, 1989): La (a) **meso-scala** (Figura 3.1.1) è la regione urbana o la città nel suo complesso, la (b) **scala locale** è costituito da una singola zona di terreno urbano o zona di utilizzo del suolo (Figura 3.1.2), e la (c) **micro-scala** è rappresentata

da alcuni isolati e dove si trova il microclima urbano (Figura 3.1.3) (Pearlmutter, William son, 2001).
È alla microscala dove l'architettura e la progettazione urbana svolgono un ruolo cruciale nella determinazione del micro clima, in questa

dimensione singole strutture e alberi influiscono su ombre e flusso del vento e il costruito contribuisce alla modifica della riflessione della luce solare e le temperature radianti, tutti aspetti a cui le persone sono direttamente esposte.

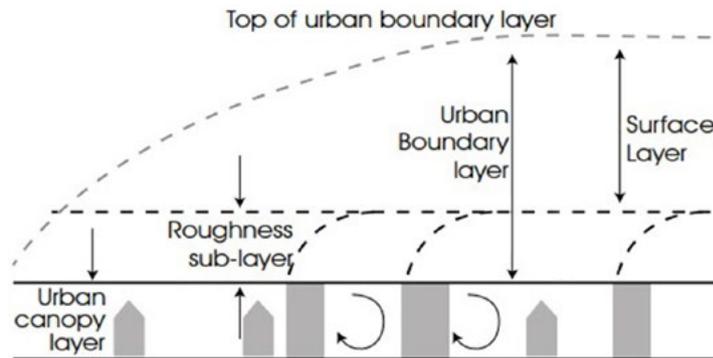


Figura 2.5.2 - Schema delle scale del clima urbano (Eltonouby, 2019).
 (b) scala locale

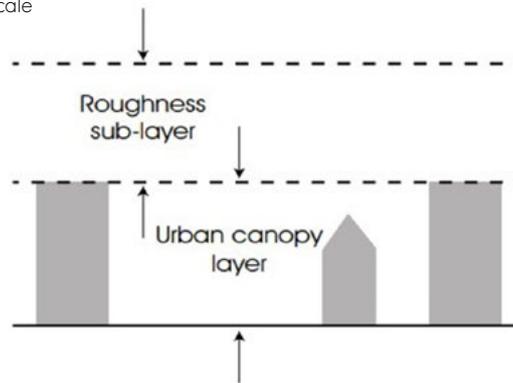


Figura 2.5.3 - Schema delle scale del clima urbano (Eltonouby, 2019).
 (c) microscala

2.5.1 URBAN HEAT ISLAND

Nelle città gli impatti del cambiamento climatico, nello specifico l'innalzamento delle temperature, sono maggiori di quelli su scala globale, dal momento in cui le città, come già detto, assorbono e trattengono molto più facilmente (Oke, 1989). Questo fenomeno è noto come l'isola del calore urbana. **L'isola di calore urbana è una delle manifestazioni più importanti del clima urbano** e la sua intensità varia in modo significativo su base diurna e stagionale (figura 3.1.1.1) e il fenomeno è noto per essere complesso (Pearlmutter, Williamson, 2001).

Le città hanno chiaramente temperature più elevate, con valori massimi registrati in corrispondenza o in prossimità della parte più densa delle aree urbane. Ci sono tre tipi di isola di calore urbana: The Boundary Layer Heat Island, the Canopy Layer Heat Island, and the Surface Heat Island (Oke, 2015). I primi due tipi sono osservati a livello atmosferico e l'ultimo a livello superficiale. Esiste una chiara relazione tra l'intensità dell'isola di calore urbana e i vari fattori che contribuiscono alla

sua formazione (Pearlmutter, Williamson, 2001). **Due dei principali fattori dell'isola di calore urbana sono: il calore antropogenico nelle città e la configurazione e i materiali di elementi urbani come gli edifici.** Gli elementi urbani che influenzano l'isola di calore urbano sono: la densità dell'edificio, le superfici impermeabili, la vegetazione e il materiale urbano. L'isola di calore urbana non è necessariamente negativa, specialmente nei climi freddi. Tuttavia, per le città in climi caldi, questi fenomeni tendono ad enfatizzare una situazione già critica.

Nel contesto del riscaldamento globale e del cambiamento climatico, l'isola di calore urbana svolge un ruolo importante in quanto il riscaldamento urbano contribuisce in qualche misura alle tendenze della temperatura su larga scala (Pearlmutter, Williamson, 2001).

Come suggerito dal l'UNEP, oltre alla necessità di attuare strategie di mitigazione, le città devono essere in grado di adattarsi al futuro microclima urbano, il che implica

«Gli elementi urbani che influenzano l'isola di calore urbano sono: la densità dell'edificio, le superfici impermeabili, la vegetazione e il materiale urbano.»

non solo un aumento del consumo di energia da parte degli edifici, ma implica anche un effetto diretto sul comfort nelle aree urbane. L'ambiente esterno è influenzato dal clima urbano, che è principalmente influenzato dall'ambiente costruito in termini di: calore antropogenico, copertura del suolo, evaporazione ed evapotraspirazione delle piante

e l'ombreggiatura da alberi e oggetti artificiali (Robitu, 2009). Nel contesto della pianificazione urbana, come l'ambiente termico esterno influenza le sensazioni termiche delle persone e cambia il loro comportamento (uso di spazi esterni) è di grande interesse per i progettisti di spazi urbani.

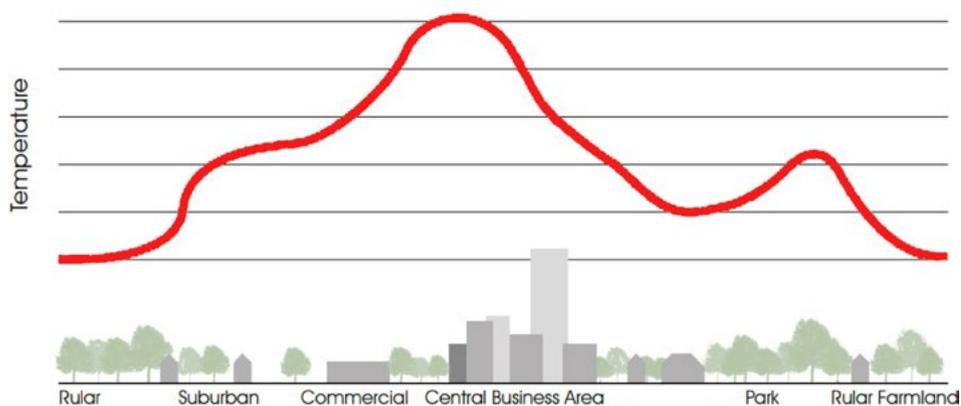


Figura 2.5.1.1 - profilo dell'isola di calore urbana (Eltonouby, 2019).

2.6 IL COMFORT TERMICO OUTDOOR E IL BENESSERE DELLE PERSONE

Il comfort termico umano viene definito come una condizione mentale, che esprime soddisfazione per l'ambiente circostante. È quindi **la percezione umana di soddisfazione**, riferita ad una serie di combinazioni di fattori fisici che influenzano la sensazione di benessere in un dato ambiente. Risulta però molto difficile da definire in modo univoco in quanto è necessario prendere in considerazione una serie di fattori ambientali, quali l'umidità, fattori personali, l'abbigliamento, il sesso o l'intensità dell'attività svolta. La teoria del comfort termico umano si basa su un modello allo stato stazionario in cui la produzione di calore è uguale alle perdite di calore nell'ambiente, con l'obiettivo di mantenere una temperatura corporea costante di 37 °C, in modo che le condizioni ambientali che forniscono soddisfazione termica, in questo caso, l'attività dei soggetti e il loro livello di vestiario sono strettamente legati (Nikolopoulou, 2001). È largamente riconosciuto che **le**

condizioni di discomfort siano da imputare ad un rapido raffreddamento o riscaldamento, questo perché i meccanismi che mantengono l'equilibrio termico con l'ambiente circostante tendono ad evitare un'estrema perdita o guadagno di energia termica (Erell, 2011).

Il raggiungimento del comfort termico è essenziale per promuovere il benessere, la produttività e le attività di svago negli spazi. È particolarmente importante nelle aree urbane, dove lo sviluppo ad alta densità e l'effetto isola di calore urbana possono portare a temperature elevate e a condizioni di disagio.

Outdoor

Il tema del **comfort outdoor è strettamente connesso ai fenomeni che avvengono nella Urban Canopy Layer**. Questa microzona, che può solitamente essere associata a un determinato isolato urbano, si differenzia notevolmente dalla zona subito circo-

«Il comfort termico umano viene definito come una condizione mentale, che esprime soddisfazione per l'ambiente circostante.»

stante a causa delle peculiarità proprie dell'UCL in esame, influenzata dalla conformazione dell'isolato, dalle altezze degli edifici che concorrono a determinare l'UCL stesso e dai materiali di finitura presenti (Gherri, 2012).

Gli spazi esterni sono importanti per le città, in quanto forniscono percorsi per il traffico pedonale giornaliero e aree per diverse attività all'aria aperta, contribuendo alla vivibilità e vitalità della città (Chen, 2012).

Per promuovere l'uso degli spazi aperti è essenziale garantire che le persone si sentano a proprio agio negli spazi esterni e il microclima urbano è uno dei tanti fattori importanti che determinano la qualità degli spazi esterni (Pearlmutter, Williamson, 2001). I pedoni e le loro attività si trovano esclusivamente nel UCL dell'atmosfera e sono direttamente esposti all'ambiente circostante e ai suoi cambiamenti di temperatura dell'aria, umidità relativa, velocità del vento e radiazione solare. **Il comfort termico outdoor è tipicamente studiato alla microsca-**la urbana e può essere descritto in termini di condizioni microclimati-

che utilizzando metodi di valutazione dello stato stazionario. Sono stati sviluppati diversi indici quantitativi che collegano le condizioni microclimatiche locali alla sensazione di comfort termica umana, consentendo una valutazione più obiettiva dello stato di benessere (Chen, 2012).

2.7 GLI INDICI DI COMFORT TERMICO

Il modo in cui percepiamo la temperatura con i nostri recettori e il modo in cui il nostro corpo risponde ai cambiamenti di temperatura influisce su quanto ci sentiamo a nostro agio. Tuttavia, a parte i nostri meccanismi di termoregolazione, **la sensazione termica non è percepita allo stesso modo da tutti gli esseri umani.** Il modo in cui ci adattiamo al nostro ambiente varia a seconda delle aspettative personali, delle opportunità disponibili, dell'età e del sesso (Robinson, 2011). Pertanto, sia metodi sperimentali che numerici sono stati utilizzati per studiare gli aspetti del comfort termico e per sviluppare modelli predittivi. I ricercatori hanno tentato di decifrare le condizioni che le persone trovano accettabili sulla base dei concetti derivati dal bilancio energetico umano all'aperto.

I primi studi sul comfort sono stati sviluppati dai ricercatori Houghton e Yagloglou dell'ASHRAE (United States Society of Heating and Ventilation Engineers) nei laboratori di ricerca di Pittsburg. Questi studi erano basati su regole empiriche e

coinvolgevano tipicamente un piccolo numero di soggetti, misurando lo scambio di energia tra il corpo umano e l'ambiente. Nel 1923, Houghton e Yaglou proposero una scala per misurare le reazioni verbali delle persone a diverse temperature, composta dai livelli "caldo", "leggermente caldo", "piacevole", "fastidioso" e "freddo".

Negli anni '60, si è compreso che la percezione della temperatura da parte delle persone era coerente con le misurazioni fisiologiche, e che altri fattori come le abitudini sociali non sembravano, invece, ad avere un ruolo determinante. Il lavoro di Fanger degli anni '70 sulla ricerca del comfort porta alla definizione dell'equazione per il voto medio previsto (Predicted Mean Vote, PMV) e la percentuale di insoddisfazione prevista (Predicted Percentage Dissatisfied PPD). La PMV ha costituito la base per la norma internazionale ISO 7730 Moderate Thermal Environments dal 1984. L'equazione PMV basandosi sul trasferimento di calore allo stato stazionario, che accade raramente nella vita reale, specialmente all'aperto, dove la

«Il modo in cui percepiamo la temperatura con i nostri recettori e il modo in cui il nostro corpo risponde ai cambiamenti di temperatura influisce su quanto ci sentiamo a nostro agio»

maggior parte delle persone si trova in uno stato di equilibrio termico dinamico ci può essere un errore o un'incertezza sul risultato perché la temperatura del corpo in azione è in continua evoluzione. Questo può essere un limite per calcolare il comfort esterno outdoor con la PMV (Pearlmutter, Williamson, 2001) e negli ultimi anni, sono stati ampiamente introdotti nuovi indici come la Physiologically Equivalent Temperature (PET) e l'Universal Thermal Climate Index (UTCI).

Predicted Mean Vote

Il Predicted Mean Vote è un indicatore di comfort termico consolidato per gli spazi chiusi che può essere impiegato anche outdoor con alcuni accorgimenti. **Il Predicted Mean Vote (PMV) è stato sviluppato negli anni '60 da Fanger come strumento di supporto alla pianificazione ambientale**, in particolare in relazione allo studio dei requisiti termici e di umidità per gli ambienti climatizzati. Fanger dimostrò che quattro variabili ambientali (temperatura del bulbo secco, temperatura media radian-

te, pressione del vapore e velocità del vento relativa) potessero essere utilizzate per calcolare il PMV delle persone, espresso su una scala di sette punti di sensazione termica (da -3 a +3)¹. Si basa su un concetto di neutralità termica, in cui 0 rappresenta la condizione ottimale di neutralità termica. **L'indicatore prende il nome dal suo scopo di prevedere la valutazione soggettiva media che gli occupanti darebbero a uno spazio in determinate condizioni ambientali** e riflette anche il modo in cui l'indicatore è stato ottenuto, attraverso esperimenti su soggetti che hanno effettivamente assegnato questo voto in base alla loro reale percezione in ambienti termo-igrometricamente controllati. Il problema non è di facile soluzione perché è influenzato da una varietà di fattori diversi. Il modello Predicted Mean Vote (PMV) tiene conto di sei diverse variabili, due delle quali sono soggettive (legate alle sensazioni dell'individuo) e quattro ambientali già citate (Cimillo, Jiaotong, 2018).

1. Si basa sull'equilibrio termico del corpo umano, che viene mantenuto attraverso il riscaldamento o il raffreddamento della pelle attraverso la traspirazione e la conduzione del calore. La PMV viene calcolata utilizzando un modello matematico che tiene conto di vari fattori, come la temperatura dell'aria, la velocità dell'aria, l'umidità relativa, la radiazione solare e la quantità di attività fisica svolta. Un valore di PMV compreso tra -0,5 e +0,5 è considerato comfort termico ottimale. Fonte: <https://www.ashrae.org/>

Physiologically Equivalent Temperature

La PET è un indice di temperatura misurato in gradi Celsius (°C) basato sul Modello di bilancio energetico delle persone di Monaco di Baviera (Munich Energy-balance Model for Individuals). Il modello di bilancio termico MEMI, introdotto da Höppe e Mayer nel 1989, si basa sull'equazione del bilancio energetico del corpo umano e restituisce una valutazione termo fisiologica rilevante della componente termica del clima. La PET, nello specifico, **è la temperatura alla quale il corpo umano mantiene il suo equilibrio termico in un ambiente tipicamente interno, con temperature interne e della pelle uguali a quelle nelle condizioni in esame** (Höppe, 1989). Si assume che il tasso metabolico sia relativamente basso (80W di attività leggera aggiunte al metabolismo di base) e che la resistenza al calore degli indumenti sia di 0,9 clo (McCullough, Jones, Huck, 1981). La valutazione del comfort termico è pertanto complessa, perché a parità di valori di

temperatura dell'aria, l'ambiente può essere percepito come molto caldo, ad esempio sotto l'effetto dell'irraggiamento solare diretto, o molto freddo, se ci si trova all'ombra ed esposti al vento² (Tucci, 2014). La PET, secondo Cimillo, è «*un valore sintetico che descrive la condizione equivalente di un soggetto standard in un ambiente standard interno. In termini esemplificativi, una PET di 20°C indica condizioni termiche equivalenti ad una stanza confinata con temperature di 20°C, velocità dell'aria pari a 0,1 m/s, pressione vapore di 12 hPa. Il soggetto standard è definito da un'attività metabolica di 80 W e abbigliamento di 0,9 Clo*». L'assunzione di valori costanti per l'abbigliamento e l'attività nel calcolo della PET è stata fatta al fine di definire un indice indipendente dal comportamento individuale. Per contro, ciò non ne limita necessariamente l'applicabilità, poiché la variazione del l'abbigliamento e del l'attività non porta a valori del PET significativamente diversi (Höppe, 1989).

L'indice della PET, porta il vantaggio di progettare gli spazi urbani sulla

«è la temperatura alla quale il corpo umano mantiene il suo equilibrio termico, con temperature interne e della pelle uguali a quelle nelle condizioni in esame»

2. Si basa sulla temperatura dell'aria, la velocità dell'aria e l'umidità relativa, e tiene conto dei diversi effetti che questi fattori hanno sulla traspirazione e il riscaldamento del corpo umano. La PET viene calcolata utilizzando un modello matematico che tiene conto dell'abbigliamento indossato dalle persone e dell'attività fisica svolta. Un valore di PET compreso tra 18°C e 26°C è considerato comfort termico ottimale. Fonte: <https://www.ashrae.org/>

base di un indicatore quantitativo e oggettivo con stabilendo gli effetti delle combinazioni dei diversi ap-

procci progettuali in termini di qualità dello spazio esterno e sostenibilità ambientale (Cimillo et al., 2018).

| PET °C | Thermal sensation | Physiological stress level |
|--------|-------------------|----------------------------|
| 4 | very cold | extreme cold stress |
| | | |
| 8 | cold | strong cold stress |
| | | |
| 13 | cool | moderate cold stress |
| | | |
| 18 | slightly cool | slight cold stress |
| | | |
| 23 | comfortable | no thermal stress |
| | | |
| 29 | slightly warm | slight heat stress |
| | | |
| 35 | warm | moderate heat stress |
| | | |
| 41 | hot | strong heat stress |
| | | |
| | very hot | extreme heat stress |

Figura 2.7.1 - Scala dello stress termico dell'indice PET (Alcoforado, 2008).

Universal Thermal Climate Index

L'Universal Thermal Climate Index (UTCI) è un indice di comfort termico sviluppato dall'International Society of Biometeorology per valutare l'impatto delle condizioni climatiche sulla salute umana. Si basa sulla temperatura dell'aria, la velocità dell'aria, l'umidità relativa e la radiazione solare, e tiene conto dei diversi effetti che questi fattori han-

no sulla traspirazione e il riscaldamento del corpo umano. L'UTCI è un indice di dimensione della temperatura misurato in gradi Celsius (°C) con l'obiettivo di sviluppare e rendere facilmente disponibile un modello di valutazione fisiologico dell'ambiente termico al fine di migliorare significativamente le applicazioni relative alla salute e al benessere, gli aspetti principali della biometeorologia umana³ (Jendritzky, Blazejczyk, 2013). **L'informa-**

3. L'Universal Thermal Climate Index (UTCI) è un indice di comfort termico sviluppato dall'International Society of Biometeorology per valutare l'impatto delle condizioni climatiche sulla salute umana. Un valore di UTCI compreso tra +9°C e +26°C è considerato comfort termico ottimale. Fonte: <https://www.ashrae.org/>

zione fornita dall'UTCI è una temperatura equivalente, espressa in °C raggruppabile in varie classi di disagio termico,

l'UTCI rappresenta lo stato dell'arte degli indici biometeorologici per gli ambienti outdoor e il risultato di questo indicatore si ottiene utilizzando contemporaneamente alcuni dati di input di modelli meteorologici, in particolare la temperatura dell'aria, velocità del vento (a 10 m), umidità relativa e radiazione solare.

L'UTCI è definito come la temperatura dell'aria (T_a) della condizione di riferimento che provoca la stessa risposta del modello delle condizioni reali. L'offset, ovvero la deviazione dell'Indice Climatico Termico Univer-

sale (UTCI) dalla temperatura dell'aria, è determinato dai valori effettivi di temperatura media radiante dell'aria (T_{mrt}), velocità del vento (v_a) e umidità, espressa come pressione del vapore acqueo (v_p) o umidità relativa (RH) (Błazejczyk, Jendritzky, Bröde, Fiala, Havenith, Epstein, Psikuta, Kampmann, 2013).

L'UTCI è stato realizzato per soddisfare determinati requisiti come il significato termo-fisiologico in tutta la gamma di condizioni di scambio termico degli ambienti termici, essendo adattabile a tutti i climi, stagioni e scale (Jendritzky, Błazejczyk, 2013). Gli indici PET e UTCI possono essere calcolati da diversi strumenti di calcolo come EN VI-met, SOLWEIG, COMFA+ e Rayman.

| UTCI (°C) range | Stress Category | UTCI (°C) range | Stress Category |
|-----------------|-------------------------|-----------------|----------------------|
| above +46 | extreme heat stress | +9 to +26 | no thermal stress |
| +38 to +46 | very strong heat stress | +9 to 0 | slight cold stress |
| +32 to +38 | strong heat stress | 0 to -13 | moderate cold stress |
| +26 to +32 | moderate heat stress | -13 to -27 | strong cold stress |

Figura 2.7.2 - Scale dello stress termico dell'indice UTCI (Eltonouby, 2019).

2.8 LA QUALITÀ DELL'ARIA

L'inquinamento atmosferico è una forma di inquinamento ambientale che riguarda la presenza di sostanze nocive nell'aria che respiriamo. Può avere diverse conseguenze sulla salute umana e sull'ambiente, come ad esempio l'aumento dei casi di asma, malattie cardiache e cancro ai polmoni. Esistono diverse misure che possono essere adottate per ridurre l'inquinamento atmosferico, come ad esempio il miglioramento dell'efficienza energetica, la promozione dell'utilizzo di fonti di energia rinnovabile e la regolamentazione delle emissioni industriali.

La qualità dell'aria degli spazi aperti urbani è un aspetto fondamentale, assieme al comfort termico, per garantire a chi si trova all'esterno un'esperienza piacevole. L'inquinamento atmosferico è quasi invisibile, ma è uno dei maggiori problemi ambientali ed è tra le sfide critiche che le società moderne devono affrontare. Il peggioramento della qualità dell'aria causati dall'inquinamento atmosferico è responsabile di gravi effetti nocivi sulla salute umana, la vita de-

gli animali, gli ecosistemi naturali e l'ambiente artificiale.

È possibile definire l'inquinamento atmosferico come il **rilascio, da parte delle attività umane¹, di diverse sostanze nell'atmosfera**, in una quantità che può influire negativamente sulla salute degli organismi viventi o disturbare la funzione dell'ambiente come sistema.

Gli inquinanti atmosferici possono essere gas, particelle solide o liquidi ed essere risultato della produzione di processi naturali o attività umane. I principali inquinanti rilasciati nell'atmosfera legati all'attività umana includono, tra gli altri:

- ossidi di carbonio, in particolare monossido di carbonio (CO) e anidride carbonica (CO₂) prodotti dal settore dei trasporti (gas di scarico dei veicoli a motore) e combustione di combustibili fossili;
- Ossidi di azoto, in particolare biossido di azoto (NO₂) emessi da combustione di combustibili fossili ad alta temperatura e produzione di elettricità;
- Ossidi di zolfo, prodotti in vari processi industriali e la produzione

1. L'inquinamento atmosferico è spesso causato dalle attività umane, come la combustione di combustibili fossili per produrre energia, il traffico veicolare e l'industria. Alcune delle sostanze chimiche più comuni che contribuiscono all'inquinamento atmosferico sono il monossido di carbonio, il biossido di azoto e il biossido di zolfo. Queste sostanze sono prodotte dalla combustione di combustibili fossili come il petrolio, il gas e il carbone e possono avere effetti negativi sulla salute umana e sull'ambiente. Può anche essere causato dalle attività agricole, come l'utilizzo di fertilizzanti e pesticidi, che possono rilasciare sostanze chimiche nell'aria. Fonte: <https://www.eea.europa.eu/>

di elettricità;

- Composti organici volatili (idrocarburi, VOC) che includono un varietà di sostanze rilasciate dalle centrali elettriche e dalle industrie produttrici numerosi prodotti come colori per la pittura, prodotti per la pulizia,

pesticidi, materiali da costruzione e mobili;

- Particolato (PM), ad oggi esso è il maggior inquinante nelle aree urbane. I componenti del particolato sono: solfati, nitrati, ione di ammonio, cloruro di sodio, particelle carboniose e polvere minerale. Sono inquinanti dell'aria solidi o liquidi principalmente emessi dalle centrali elettriche e dal settore dei trasporti (aeromobili, veicoli a motore), miniere e inceneritori;

- Ozono a livello del suolo (O_3), un inquinante atmosferico che deriva da reazioni fotochimiche tra ossidi di azoto (NO_x) e volatili composti organici (VOC) in presenza di luce solare;

- Metalli tossici in particolare piombo (Pb), cadmio (Cd) e cooper (Cu) emessi dal settore dei trasporti (gas di scarico dei veicoli a motore), non-

ché da procedure industriali (produzione di colori per la verniciatura, processi minerari).

Un aumento della popolazione nelle aree urbane comporta un aumento della domanda nei trasporti, nella produzione industriale e nell'energia, che costituiscono le principali fonti di inquinamento atmosferico esterno (Dimitriou, Christidou, 2011).

A differenza degli indici di comfort termico descritti sopra a stabilire o meno la qualità dell'aria non sono percezioni ma la concentrazione delle sostanze nell'aria con riferimento ai limiti giornalieri (spesso espressi in $\mu g/m^3$) e definiti dall'EMA (European Medicines Agency).

Per stabilire il livello di qualità di un certo campione d'aria si può usare l'European Air Quality Index², che consente agli utenti di comprendere meglio la qualità dell'aria in cui vivono, lavorano o viaggiano. L'indice si basa sui valori di concentrazione per un massimo di cinque inquinanti chiave, tra cui:

particolato (PM10);

2. L'European Air Quality Index (EAQI) è un indice di qualità dell'aria sviluppato dall'Agenzia Europea per l'Ambiente (AEA) che fornisce informazioni sulla qualità dell'aria in tutta Europa. L'EAQI viene calcolato utilizzando i dati sulla concentrazione di cinque diversi inquinanti atmosferici: biossido di azoto, ozono, particolato fine (PM10), particolato ultrafine (PM2,5) e monossido di carbonio. Fonte: <https://www.eea.europa.eu/>

particolato fine (PM_{2.5});
ozono (O₃);
biossido di azoto (NO₂);
anidride solforosa (SO₂).

e riporta il potenziale impatto della qualità dell'aria sulla salute (European Environment Agency, 2022).

| Pollutant | Index level (based on pollutant concentrations in µg/m ³) | | | | | |
|---|--|---------|----------|---------|-----------|----------------|
| | Good | Fair | Moderate | Poor | Very poor | Extremely poor |
| Particles less than 2.5 µm (PM _{2.5}) | 0-10 | 10-20 | 20-25 | 25-50 | 50-75 | 75-800 |
| Particles less than 10 µm (PM ₁₀) | 0-20 | 20-40 | 40-50 | 50-100 | 100-150 | 150-1200 |
| Nitrogen dioxide (NO ₂) | 0-40 | 40-90 | 90-120 | 120-230 | 230-340 | 340-1000 |
| Ozone (O ₃) | 0-50 | 50-100 | 100-130 | 130-240 | 240-380 | 380-800 |
| Sulphur dioxide (SO ₂) | 0-100 | 100-200 | 200-350 | 350-500 | 500-750 | 750-1250 |

Figura 2.8.1 - Livello di concentrazione inquinanti e gli effetti sulla qualità dell'aria (European Environment Agency).

/03

ENVI-MET

3.1 INTRODUZIONE AL SOFTWARE ENVI-MET

Envi-met¹ è un software di simulazione ambientale e microclimatica a modello tridimensionale in grado di simulare e riprodurre il comportamento micro-climatico e fisico di aree urbane. Il modello considera le interazioni tra edifici, superfici, vegetazione, flussi di aria ed energia in un'area urbana e come queste sono influenzate dal microclima locale. Il software è anche in grado di simulare fattori legati all'impatto della vegetazione sui microclimi urbani, compresi i flussi di aria e di calore, nonché la qualità dell'aria e la diffusione degli inquinanti. Il software è in grado di simulare microaree urbane con una risoluzione² variabile tra 0.5 e 10 metri, e per un periodo di tempo che può essere compreso tra le 24 e le 48 ore, con un time-step massimo di calcolo di 10 secondi. La capacità di analizzare le interazioni tra edifici, superfici e vegetazione su piccola scala è resa possibile da questa combinazione di risoluzioni. Envi-met utilizza metodi numerici per risolvere le equazioni della fluidodinamica al fine di simulare l'ambiente (Salata, Golasi, 2016).

Il modello di calcolo implementato comprende:

- flussi di radiazioni su tutto lo spettro, dall'infrarosso all'ultravioletto, rispettando l'ombreggiamento, la riflessione e l'emissione delle radiazioni dal sistema di edifici e vegetazione;
- traspirazione, evaporazione e flussi di calore sensibile dalla vegetazione nell'aria;
- simulazione completa dei fattori fisici delle piante, come ad esempio la reazione di fotosintesi ed i suoi effetti;
- temperatura delle superfici dell'area di simulazione (edifici e suolo);
- scambi di calore e di acqua all'interno del suolo;
- calcolo di parametri quali la temperatura media radiante e la PET dei fruitori dell'area in analisi;
- dispersione di gas di scarico quali particolato;
- flussi d'aria e turbolenze, dati relativi al vento.

Funzionalità del software

1. Il software ENVI-Met è stato sviluppato dall'ENVI-Met Team, un gruppo di ricercatori di diverse università e istituti di ricerca europei. È disponibile in diverse versioni per Windows e Linux, ed è utilizzato in diversi progetti di ricerca e studio in tutto il mondo. Fonte: Envi-met

2. La risoluzione della simulazione su ENVI-Met è una delle opzioni che il programma offre per configurare la precisione del modello di simulazione. La risoluzione spaziale indica la quantità di punti di calcolo utilizzati per rappresentare l'ambiente simulato, mentre la risoluzione temporale indica il passo temporale tra due punti di calcolo successivi. Aumentare la risoluzione spaziale e temporale del modello comporta un aumento della precisione della simulazione, ma anche un aumento dei tempi di calcolo. Fonte: Envi-met

Envi-met è costituito da diverse interfacce, ognuna delle quali è necessaria per comporre una parte della simulazione o per leggere i dati di output (Figura 3.5.1). Ci sono tre principali componenti di input alla base struttura del software che confluiscono nell'interfaccia che esegue la simulazione applicando modelli di calcolo. Per la simulazione ENVI-met utilizza il sistema a griglia Arakawa³, usato per calcolare

quantità fisiche ortogonali su griglie rettangolari nei modelli del sistema terrestre per la meteorologia ortogonale e il metodo delle differenze finite per risolvere la moltitudine di equazioni differenziali parziali (ENVI-met, 2015). I risultati dei calcoli sono raggruppati poi in diversi file di output, che possono essere letti e analizzati utilizzando due diverse interfacce.

3. La griglia di Arakawa è una griglia di calcolo utilizzata in alcuni modelli di simulazione meteorologica, tra cui il software ENVI-Met, per rappresentare l'ambiente simulato. La griglia di Arakawa è una griglia di tipo "staggered", ovvero le variabili meteorologiche sono rappresentate su punti di calcolo diversi all'interno della griglia. In particolare, la griglia di Arakawa prevede che le variabili meteorologiche come la temperatura, l'umidità e la pressione atmosferica siano rappresentate su punti di calcolo al centro delle celle della griglia, mentre le componenti del vento sono rappresentate su punti di calcolo spostati di una metà cella rispetto al centro. Fonte: (Bruse, 2004)

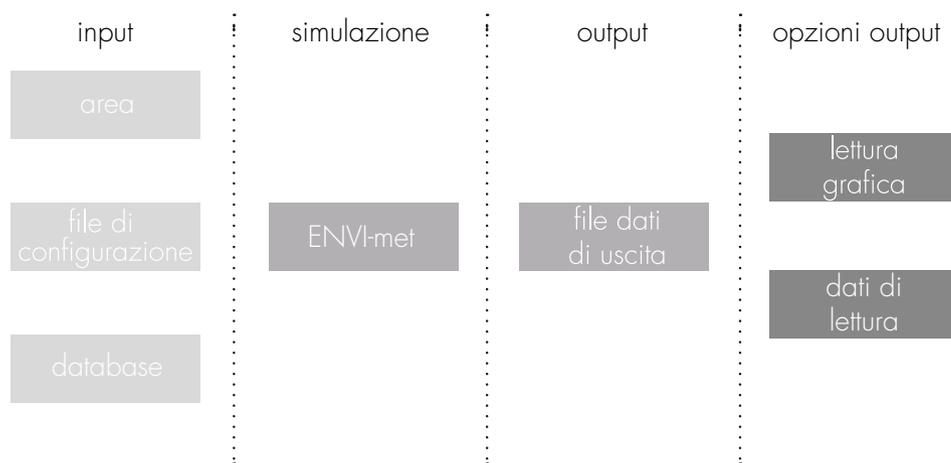


Figura 3.1.1 - Schema di struttura del software ENVI-met (Envimet, 2015).

Parametri di input

Come detto, per eseguire una simulazione tramite ENVI-met sono richiesti diversi parametri di input del modello (Bruse, 2004) e devono

essere forniti al software attraverso tre categorie:

Area Input File, *File di configurazione* e *Database*.

Il "Area Input File" viene creato at-

traverso un'interfaccia grafica e contiene principalmente i dati geometrici del modello simulato, mentre il "File di configurazione" presenta i parametri di calcolo iniziale e le condizioni al contorno che caratterizzano la simulazione. Infine i tipi di "Database": come i dati riguardo la vegetazione, la stratigrafia del suolo e il traffico automobilistico. Ogni file contiene parametri utilizzati per le equazioni dei modelli fisico-matematici implementati dalla software. Questi tre elementi vengono importati nell'interfaccia che svolge la vera e propria simulazione applicando i modelli di calcolo.

Modello

Il file **Area** è creato attraverso l'interfaccia grafica del software e contiene i dati geometrici del modello simulato, tra cui:

- Dimensione dell'area
- Edifici (altezza, sporgenze e rientranze)
- Spazi verdi (a terra ed in quota)
- Tipo di vegetazione
- Strade
- Tipologie di suolo
- Presenza di specchi d'acqua.

E' attraverso questa interfaccia che si identifica la zona geografica in cui l'area di modello è posta e l'orientamento cardinale della stessa. La determinazione dell'area geografica avviene attraverso la scelta di una città cui associare l'area, oppure mediante l'indicazione delle coordinate di latitudine e longitudine del sito.

File di configurazione

contiene tutti quelli che sono i parametri iniziali di calcolo e le condizioni a contorno della simulazione e alcuni altri dati aggiuntivi relativi all'area modellata.

Il file contiene le seguenti informazioni:

- Data solare relativa alla simulazione
- Durata relativa alla simulazione (ore oggetto della simulazione)
- Ora di inizio della simulazione (nel giorno indicato al primo punto)
- Time-step di calcolo (ovvero l'intervallo di tempo al quale il programma associa la risoluzione delle equazioni)

- Dati relativi agli edifici (albedo e trasmittanze delle chiusure)
- Dati relativi al suolo (albedo, temperatura e umidità relativa superficiale e a diverse profondità)
- Dati relativi al vento (direzione di provenienza, velocità dal suolo, rugosità del suolo)
- Presenza di nuvole in cielo
- Eventuali sorgenti di gas inerti o particolato
- Opzioni relative al tipo di condizioni a contorno per il calcolo
- Modelli e condizioni di calcolo per le turbolenze dell'aria

I **database** associati ad ogni modello di simulazione (a sua volta formato da una coppia file "area" e file "configurazione") sono tre: uno relativo alla vegetazione, uno alla stratigrafia del suolo, uno contenente dati relativi ad ogni strato del suolo.

Ognuno di questi file contiene dati e parametri che vengono poi impiegati nelle equazioni dei modelli fisico-matematici implementati dal software. Si tratta di dati legati alla tipologia specifica di piante o terre-

no: contenuto d'acqua, conducibilità termica, albedo (Figura 3.5.2), caratteristiche fisiologiche delle foglie e delle radici (Salata, Golasi, 2016).

Simulazione

L'interfaccia di simulazione è la parte centrale del software in cui gli utenti possono inserire i file relativi al modello e avviare i calcoli. Il software fornisce un'indicazione in tempo reale del tempo simulato e di eventuali errori che si verificano durante l'esecuzione. Ciò consente di monitorare i progressi e di identificare e affrontare rapidamente potenziali problemi. Questo capitolo fornisce una panoramica dei metodi utilizzati per calcolare i risultati, nonché i modelli utilizzati e vari aspetti del processo di calcolo (Salata, Golasi, 2016).

Output

Envi-met genera una varietà di output che vengono ordinati in file e cartelle in base ai campi dati associati ai dati. Esistono due tipi di file: quelli che possono essere letti e importati nei programmi di calcolo

e quelli a cui è possibile accedere solo tramite l'interfaccia del software. Sono disponibili due interfacce per la visualizzazione dei dati: un'interfaccia grafica che consente di visualizzare una rappresentazione in scala cromatica dei dati con isolinee o rappresentazione vettoriale, e una seconda interfaccia che consente di "tagliare" il modello tridimensionale con piani orizzontali o verticali ed estrarre in un file di testo solo i dati relativi a quella sezione (Salata, Golasi, 2016).

Le interfacce grafiche consistono in: Mappe di distribuzione delle variabili meteorologiche: il software permette di visualizzare la distribuzione della temperatura, dell'umidità, della radiazione solare e dell'irraggiamento dell'ambiente simulato. Grafici di andamento delle variabili meteorologiche: il software permette di generare grafici che mostrano l'andamento delle variabili meteorologiche nel tempo, ad esempio la temperatura media giornaliera o la quantità di radiazione solare ricevuta in una giornata. Indicatori di comfort termico: il software permette di calcolare indicatori di comfort

termico come l'indice di temperatura equivalente o l'indice di temperatura di raffreddamento, che forniscono informazioni sulla percezione del comfort termico da parte delle persone all'interno dell'ambiente simulato.

Mappe di distribuzione della velocità del vento: il software permette di visualizzare la distribuzione della velocità del vento all'interno dell'ambiente simulato. Mappe di distribuzione della dispersione dei contaminanti: il software permette di valutare la diffusione di contaminanti nell'aria, ad esempio il monossido di carbonio, e di visualizzarla su una mappa.

| | |
|-----------------------|------------|
| <i>erba</i> | <i>0,2</i> |
| <i>asfalto</i> | <i>0,1</i> |
| <i>cemento chiaro</i> | <i>0,5</i> |
| <i>cemento scuro</i> | <i>0,4</i> |

Figura 3.1.2 - Tabella dei valori di albedo delle principali superfici.

3.2 CONDIZIONI METEO-AMBIENTALI AL CONTORNO

I dati climatici della zona e i parametri della qualità dell'aria sono misurati dall'Arpa Piemonte e consultabili in formato orario sul sito web dell'ente. Per ottenere i dati di Temperatura dell'aria, Umidità relativa e Velocità e Direzione del vento ad intervalli di 30 minuti (come richiesto dal software di simulazione) è stato necessario fare richiesta specifica ad Arpa.

Sparse su tutto il territorio regionale varie sono le stazioni di raccolta dati riferite alla qualità dell'aria (stazioni di fondo o di traffico) o ai dati climatici. Nello specifico, tra gli impianti presenti nel comune di Torino, sono state prese in considerazione le stazioni più vicine e/o che si trovassero in un contesto il più simile alla zona della sede centrale di Ingegneria del Politecnico.

Dati climatici

Per quanto riguarda la stazione di riferimento per la raccolta dei dati di Temperatura dell'aria, Umidità relativa e Velocità e Direzione del vento è stata scelta la stazione urbana Via

della Consolata¹ in quanto la più vicina al luogo del caso studio e in un contesto urbano analogo al quartiere del Politecnico. La stazione in questione è posizionata sul tetto di un edificio di 4 piani fuori terra e si trova ad 1,5 km dall'università.

Per simulare il peggior scenario possibile sono stati scelti i dati meteorologici del giorno più caldo dell'estate 2022 e quindi il 25 Luglio (Figura 3.6.1).

Qualità dell'aria

Il dato di input della qualità dell'aria è stato scaricato dalle rilevazioni della stazione di fondo Rubino distante 3,5 km e posizionata in modo tale che il livello di inquinamento non sia influenzato prevalentemente da specifiche fonti (industrie, traffico, riscaldamento residenziale, etc.) ma dal contributo integrato di tutte le fonti poste sopravvento alla stazione rispetto alle direzioni predominanti dei venti nel sito. I dati raccolti consistono nei livelli orari di concentrazione di particolato PM10 e PM2,5 nel giorno 11 Ottobre 2022 (Figura

1. La stazione di Giardini Reali, risulta di fatto essere più vicina al Politecnico rispetto La Consolata, ma posizionata all'interno dell'omonimo parco e quindi un contesto distante rispetto a quello del campus universitario e priva inoltre di anemometro.

3.6.2). La scelta di recuperare i dati riguardanti la concentrazione di particolato in un giorno diverso rispetto a i dati presi per il clima è dettata dal fatto che nei giorni estivi il traffico veicolare è inferiore rispetto agli altri periodi dell'anno e le con-

centrazioni di particolato sarebbero state decisamente inferiori. Dai dati recuperati dall'Arpa Piemonte, è stato ricavato un valore medio giornaliero di PM10 e PM2,5 da inserire come dato background di inquinamento.

Dati climatici

Qualità dell'aria

| ORA | Ta (°C) | RH (%) | v (m/s) | Direzione vento | Ora | PM10 (µg/m ³) | PM2.5 (µg/m ³) |
|-------|---------|--------|---------|-----------------|-------|---------------------------|----------------------------|
| 00:00 | 29,1 | 60 | 1,4 | 6 | 00:00 | 21.0 | 12.0 |
| 01:00 | 28,6 | 62 | 0,7 | 20 | 01:00 | 23.0 | 14.0 |
| 02:00 | 28 | 64 | 1,4 | 359 | 02:00 | 26.0 | 21.0 |
| 03:00 | 27,5 | 64 | 0,9 | 45 | 03:00 | 19.0 | 4.0 |
| 04:00 | 27 | 66 | 1,2 | 56 | 04:00 | 22.0 | 11.0 |
| 05:00 | 27,2 | 66 | 1,1 | 40 | 05:00 | 18.0 | 4.0 |
| 06:00 | 27,4 | 64 | 1,8 | 75 | 06:00 | 19.0 | 11.0 |
| 07:00 | 28 | 62 | 1,8 | 4 | 07:00 | 12.0 | 7.0 |
| 08:00 | 28,7 | 59 | 1,8 | 61 | 08:00 | 15.0 | 4.0 |
| 09:00 | 31,4 | 49 | 1,9 | 51 | 09:00 | 20.0 | 13.0 |
| 10:00 | 32,2 | 45 | 1,6 | 54 | 10:00 | 30.0 | 17.0 |
| 11:00 | 33,7 | 41 | 2,2 | 199 | 11:00 | 36.0 | 24.0 |
| 12:00 | 34,6 | 37 | 1,1 | 187 | 12:00 | 24.0 | 19.0 |
| 13:00 | 35,5 | 34 | 2,2 | 220 | 13:00 | 12.0 | 4.0 |
| 14:00 | 35,2 | 34 | 1,5 | 186 | 14:00 | 14.0 | 8.0 |
| 15:00 | 35,6 | 34 | 1,5 | 118 | 15:00 | 27.0 | 17.0 |
| 16:00 | 35,6 | 35 | 1,1 | 233 | 16:00 | 10.0 | 4.0 |
| 17:00 | 35,1 | 32 | 1,7 | 274 | 17:00 | 25.0 | 16.0 |
| 18:00 | 26,7 | 60 | 3,8 | 12 | 18:00 | 15.0 | 10.0 |
| 19:00 | 25,4 | 63 | 1,5 | 52 | 19:00 | 30.0 | 18.0 |
| 20:00 | 26 | 64 | 2 | 254 | 20:00 | 21.0 | 13.0 |
| 21:00 | 25,6 | 62 | 1,4 | 217 | 21:00 | 20.0 | 15.0 |
| 22:00 | 25,9 | 62 | 2,3 | 219 | 22:00 | 17.0 | 12.0 |
| 23:00 | 25,6 | 59 | 3,6 | 208 | 23:00 | 21.0 | 11.0 |
| 24:00 | 25 | 64 | 2,5 | 205 | 24:00 | 24.0 | 10.0 |

Figura 3.2.1 - Tabella dei dati climatici del giorno 25/07/2022 (Arpa Piemonte, 2022)².

Figura 3.2.2 - Tabella dei dati della qualità dell'aria del giorno 11/10/2022 (Arpa Piemonte, 2022).

2. I dati consegnati da Arpa per quanto riguarda i dati climatici della stazione di rilevamento de La Consolata, sono ad intervallo di 30 minuti (così come richiesto dal file di configurazione di EN-VI-met) ma per semplicità si riportano ad intervalli orari.

3.3 FLUSSI DEI VEICOLI A MOTORE

La simulazione della dispersione di inquinanti passivi e attivi è stata implementata con la versione del software ENVI-met rilasciato nel 2021.

Per il calcolo del particolato è stato necessario impostare le sorgenti di particolato attive, per questo caso studio sono state tenute in considerazione solamente gli scarichi delle automobili e autobus mentre le altre sorgenti di PM_{10} , quali potrebbero essere caldaie, centrali termiche e industrie non sono state inserite.

L'input richiesto dal software per l'impostazione delle sorgenti è una distribuzione giornaliera di traffico, suddivisa in percentuale tra automo-

bili, scooters e autobus. Per ottenere questa distribuzione sono state prese le rilevazioni (Figura 3.7.1 e 3.7.2) del passaggio dei veicoli su più punti del sito, anche ridondanti, e poi è stato inserito come input una distribuzione del passaggio di automobili in base al picco rilevato sul posto nell'intervallo di punta compreso tra le 14:30 e le 17:30¹. Sono stati così individuati i flussi sulle arterie viarie principali mentre per controviali e strade secondarie è stata fatta un'approssimazione rispettivamente del 10% e del 5% del flusso della strada principale più vicina.

| <i>strade principali</i> | <i>passaggi orari nel periodo di picco</i> |
|--|--|
| a - C.so Einaudi/C.so Duca degli Abruzzi | 2.100 |
| b - C.so Duca degli Abruzzi | 1.500 |
| c - C.so Duca degli Abruzzi/C.so Stati Uniti | 1.100 |
| d - C.so Stati Uniti/C.so Castelfidardo | 1.000 |
| e - Via Boggio | 1.100 |
| f - Via Boggio/Via Fratelli Bandiera | 600 |
| g - C.so Ferrucci | 1.900 |
| h - C.so Peschiera | 2.100 |
| i - C.so Duca degli Abruzzi/C.so Mediterraneo | 1.600 |

1. Il software Envi-met pone l'intervallo orario compreso tra le 15 e le 16 come il picco giornaliero di passaggi dei veicoli.

Figura 3.3.1 - Tabella passaggi orari nel periodo di picco

11/10/2022



Figura 3.3.2 - Punti di rilevamento dati passaggi veicoli a motore e ampiezza flussi.



a

Figura 3.3.3 - Punto di rilevamento a - incrocio C.so Duca degli Abruzzi e C.so Luigi Einaudi



b

Figura 3.3.4 - Punto di rilevamento b - ingresso su C.so Duca degli Abruzzi



c

Figura 3.3.5 - Punto di rilevamento c - C.so Castellidardo fonte: Google Maps

d



Figura 3.3.6 - Punto di rilevamento d - C.so Castellidardo fonte: Google Maps

e



Figura 3.3.7 - Punto di rilevamento e - via Paolo Borsellino

f



Figura 3.3.8 - Punto di rilevamento f - incrocio via Fratelli bandiera e Via Pier Carlo Boggio



g

Figura 3.3.9 - Punto di rilevamento g - incrocio C.so Francesco Ferrucci e C.so Peschiera



h

Figura 3.3.10 - Punto di rilevamento h - C.so Peschiera

i



Figura 3.3.11 - Punto di rilevamento i - incrocio C.so Peschiera e C.so Mediterraneo

l



Figura 3.3.12 - Punto di rilevamento l - C.so Luigi Einaudi

3.4 MODELLAZIONE DELL'AERA DELLO STATO DI FATTO SU ENVI-MET

Al fine di analizzare tutte le criticità della sede del Politecnico e del suo intorno, è stato utile fare ulteriori analisi, a livello globale, che tenessero conto sia dell'effetto isola di calore che dell'inquinamento presente nell'area si è proceduto effettuando la simulazione attraverso il software Envi-met, grazie al quale è stato possibile modellare l'intera area attribuendo tutte le caratteristiche necessarie. Per definire il modello utile per una simulazione Envi-met è necessario definire la geolocalizzazione dell'area, la topografia, la Geometria e la tecnologia degli edifici, i marciapiedi, le strade, le aiuole e le diverse tipologie di verde, il traffico e i valori di inquinamento di base. Il nostro caso studio ha preso in considerazione un'area quadrata di 810 metri di lato che avesse come baricentro il Politecnico e la cittadella e parte di città nelle immediate vicinanze.

Geolocalizzazione e

topografia

Attraverso il tool di Envi-met Monde, è stato possibile definire la posizione dell'area da simulare, selezionando appunto la città di Torino. In seguito, è stato possibile abbinare all'area selezionata la relativa superficie topografica creando così il file base per la modellazione, l'area è un quadrato di 810 metri di lato con una risoluzione sugli assi x e y di 3 metri, mentre è stata impostata una risoluzione di 4 metri per le altezze (Figura 3.8.3).

Edifici

Successivamente sono stati modellati tutti gli edifici esistenti nell'area, attribuendo a questi delle caratteristiche tecnologiche per le pareti e i tetti. In particolare, è stato selezionato un muro con un discreto isolamento termico e lo stesso è stato fatto per le coperture. Questa approssimazione è stata fatta in quanto, le variazioni della tecnologia costruttiva, avrebbero influito poco sui

risultati. In ogni caso, per le informazioni utili alla simulazione, è stato attribuito un albedo medio (0,5) per la superficie dei muri e coperture. Questo dato, è necessario per la determinazione della PET e poi per aiutare a quantificare l'isola di calore nella zona.

Superfici stradali

È stato poi modellato l'ambiente urbano e quindi i marciapiedi e le strade con le loro caratteristiche materiche. In generale è stato usato l'asfalto per tutte le strade e alcune corti intere destinate caratterizzate da traffico stradale, mentre un cemento chiaro per i marciapiedi in materiale lapideo e gli altri rivestimenti delle pavimentazione che non fossero asfalto. I materiali definiti per le superfici sono quindi due: asfalto scuro (albedo 0,1) per tutte le carreggiate e pavimentazione in cemento grigio chiaro (albedo 0,5) per i marciapiedi e le superfici rimanenti.

Definizione del verde

All'interno delle strade sono poi state inserite le varie aiuole e aree verdi per posizionare poi gli alberi. Gli alberi selezionati sono alberi a foglie caduche di diverse altezze 5m, 10m e 20m.

Le tipologie di verde selezionate sono state prese dal tool relativo alla vegetazione *Albero* o create nuove nel tool *Database*. Al fine di inserire la tipologia e l'altezza corretta delle alberature, queste ultime sono state identificate attraverso il censimento del comune di Torino sul geoportale, in cui viene riportata la specie e l'altezza.

Traffico

Per determinare il traffico presente sull'area si è preso come riferimento la rilevazione manuale effettuata il giorno 11 Ottobre 2022 nell'intervallo orario 14:30-17:30, come già anticipato sopra. Tale conteggio tiene conto anche delle diverse categorie di veicoli (Figura 3.8.1). Da questi dati si è stabilito un andamento giornaliero proporzionale tenendo conto degli orari di punta. È stato quindi poi possibile determinare per ogni strada il numero mas-

simo di veicoli in circolazione nel corso di 24 ore. Per semplificazione le differenze minime di traffico durante i picchi sono state arrotondate

ottendo così un numero più contenuto di tipologie strade da creare nella sezione Sources di ENVI-met.

| <i>strade principali</i> | <i>passaggi giornalieri</i> |
|--|-----------------------------|
| a - C.so Einaudi/C.so Duca degli Abruzzi | 35.000 |
| b - C.so Duca degli Abruzzi | 22.500 |
| c - C.so Duca degli Abruzzi/C.so Stati Uniti | 17.000 |
| d - C.so Stati Uniti/C.so Castelfidardo | 15.000 |
| e - Via Boggio | 17.000 |
| f - Via Boggio/Via Fratelli Bandiera | 10.00 |
| g - C.so Ferrucci | 32.000 |
| h - C.so Peschiera | 35.000 |
| i - C.so Duca degli Abruzzi/C.so Mediterraneo | 23.000 |

Figura 3.4.1 - Tabella passaggi giornalieri veicoli

| <i>Geolocalizzazione</i> | | <i>Geometria del modello</i> | |
|----------------------------------|---------------|-------------------------------------|--|
| <i>Città</i> | <i>Torino</i> | <i>griglia-X</i> | 270 |
| <i>Latitudine (deg, +N, -S)</i> | 45° 04' 13" | <i>griglia-Y</i> | 270 |
| <i>Longitudine (deg, +N, -S)</i> | 7° 41' 12" | <i>griglia-Z</i> | 60 |
| | | <i>dX</i> | 3.00 m |
| | | <i>dY</i> | 3.00 m |
| | | <i>dZ</i> | 1.00 m |
| | | <i>suddivisione celle verticali</i> | <i>dZ inferiore suddiviso in 5 sub celle</i> |

Figura 3.4.2 - Impostazioni geografiche e delle geometrie del modello

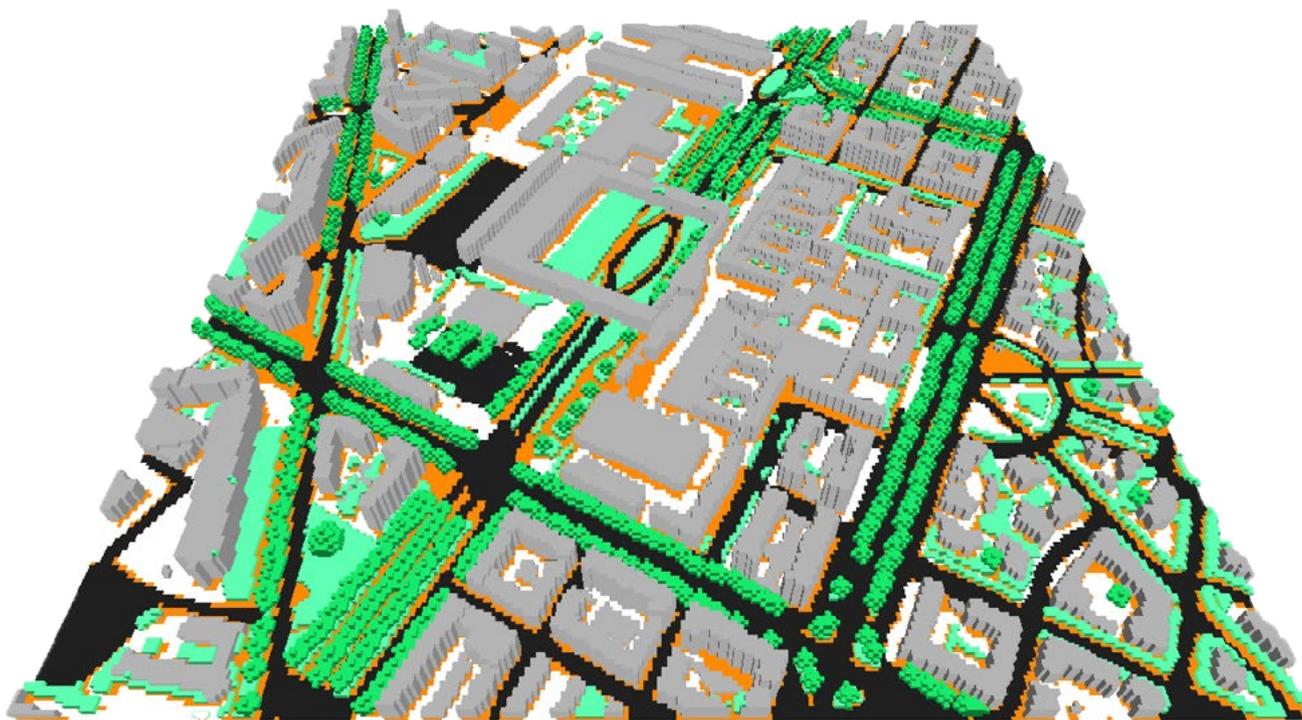


Figura 3.4.3 - Modello dell'area estratto da Space

3.4.1 SIMULAZIONE DELL'AREA DEL MASTERPLAN DI ATENE SU ENVI-MET

Il software consente di simulare il microclima urbano come un unico sistema interattivo. Per far ciò tiene conto delle interazioni dinamiche dell'atmosfera, della fisica del suolo, della risposta della vegetazione, ricreando quindi il reale comportamento del sistema ambientale.

Dati di input

Per il corretto funzionamento del software è necessario definire una serie di dati di input relativi alla descrizione dettagliata del suolo, degli edifici, della vegetazione e delle condizioni atmosferiche iniziali.

Ogni simulazione microclimatica di una determinata area necessita della definizione di due file di input:

File grafico: in questo file si determinano la geometria dell'area, la vegetazione presente, eventuali fonti di inquinamento, i materiali etc.

File di configurazione: all'interno di questo file vengono stabiliti i setting del modello, ovvero data e tempo di simulazione, variabili da calcolare, tipi di output che si vogliono

ottenere etc.

Per l'impostazione del file grafico si è utilizzato l'apposito tool di EnviMet chiamato "Spaces". Prima di modellare la geometria si sono definiti una serie di parametri.

Il primo parametro definito è la geolocalizzazione dell'area: e sono state e specificate le coordinate della città di Torino. Successivamente, si è definita la dimensione della griglia. Tale griglia è stata definita di forma quadrata, di 270x270 punti, con ogni punto di dimensioni 3x3m. Si è quindi determinato uno spazio di 810x810m. Alla griglia si abbina poi una dimensione in punti anche per l'altezza z pari a 40m, circa il doppio dell'altezza dell'edificio più alto, con una accuratezza di 4x4m. Una volta definita anche l'altezza dello spazio di simulazione si è ottenuto un involucro tridimensionale, necessario per le simulazioni fluidodinamiche. A tale involucro sono state poi aggiunte le "griglie di nesting", ovvero uno spazio ag-

giuntivo di ulteriori 4 punti in tutte le direzioni, necessari per ottenere risultati più accurati sul contorno.

Una volta definito lo spazio, è stato possibile modellare gli edifici. Per modellare gli edifici a livello geometrico è stato necessario definirne l'altezza e anche le caratteristiche dell'involucro. Si sono poi modellati i marciapiedi e le strade asfaltate, scegliendo sempre tra i materiali di rivestimento del DatabaseManager del programma.

Nello spazio definito è stato poi possibile collocare le *sources*, ovvero le fonti inquinanti. Per la definizione del traffico su strada si è fatto riferimento ai dati ricavati dalle rilevazioni effettuate sul sito. Dopo aver modellato l'area del Politecnico si passa al processo di simulazione. ENVI-MET richiede di inserire diversi input di grandezze atmosferiche nella sezione "ENVI-guide". I principali valori di input utilizzati nello studio proposto sono: la temperatura dell'aria (Ta), l'umidità relativa (RH) la velocità del vento (v) e la sua direzione prevalente. Le stazioni meteorologiche da cui sono stati recuperati i dati, come già accennato, sono

rispettivamente: la stazione Giardini Reali per la temperatura dell'aria, l'umidità relativa, la velocità e la direzione del vento e la stazione di fondo Rubino per le polveri sottili.

File di configurazione

All'interno di questo file si sono determinati il periodo e la durata della simulazione. Si è scelto di simulare il 25 Luglio 2022 come giorno rappresentativo del periodo estivo, nel quale, si è raggiunta la massima temperatura registrata nel corso dell'anno. Come periodo di simulazione si è scelto di simulare tutta la giornata partendo alle 00.00 del 25 fino alle ore 00.00 del giorno 26. la simulazione è stata poi condotta con la modalità *Simple forcing*, inserendo il file contenente tutte le informazioni climatiche acquisite tramite Arpa Piemonte e successivamente specificando quali outputs ottenere dalla simulazione. Si è scelto di simulare i valori di inquinanti presenti nell'aria specificando dei valori di background (Arpa Piemonte) riguardo al PM2.5 e PM10 e la PET.

3.5 MODELLAZIONE E SIMULAZIONE DEL MASTERPLAN DI ATENE SU ENVI-MET

Al fine di valutare gli effetti degli interventi previsti dal Masterplan di Atene è stato necessario modellare, sulla base del modello dello stato di fatto, gli interventi previsti.

Edifici

Vengono aggiunti al modello la nuova manica su C.so Castelfidardo, i due bassi edifici nel cortile del sovrappasso, i due edifici per il welfare degli studenti nel ex parcheggio delle aule M e N e l'ampliamento delle aule R con il nuovo centro di ricerca su Via Boggio. Per quanto riguarda le qualità di questi costruzioni viene attribuito lo stesso albedo usato per gli edifici esistenti, in quanto non è ancora definita la rifinitura di questi ultimi. In particolare si lascia un albedo medio di 0,5 per pareti e coperture.

Superfici e pavimentazioni

Vengono rimossi i parcheggi a raso

asfaltati (albedo 0,9) sia in corrispondenza delle aule M e N sia alle spalle della residenza Universitaria Mollino. Anche il tratto di controviale in corrispondenza dell'ingresso principale su C.so Duca degli Abruzzi viene toccato dal piano progettuale. L'asfalto viene sostituito con materiale lapideo più chiaro e la velocità delle automobili limitata a 20 Km/h.

Verde

L'eliminazione di gran parte dei parcheggi a raso, sostituiti con autorimesse interrato, ha permesso la conversione di ampie superfici di asfalto con alto albedo in superfici verdi, nello specifico in prato. Inoltre sono stati aggiunti gli alberi ad alto fusto in ogni parte della sede universitaria, sia in nucleo originale su C.so Duca degli Abruzzi sia sulla parte del cosiddetto *raddoppio*.

Simulazione

Per quanto riguarda il lancio della

simulazione del progetto di Masterplan sono state mantenute le stesse condizioni climatiche e di inquinamento usate per la prima simulazione. Il file .SIMX, precedentemente creato per la simulazione dello stato di fatto, contenente i dati riguardan-

ti la qualità della simulazione viene riutilizzato per l'analisi climatica del progetto del Masterplan di ateneo. L'uso dello stesso file di configurazione pone sullo stesso livello le due simulazioni rendendo così possibile la comparazione.

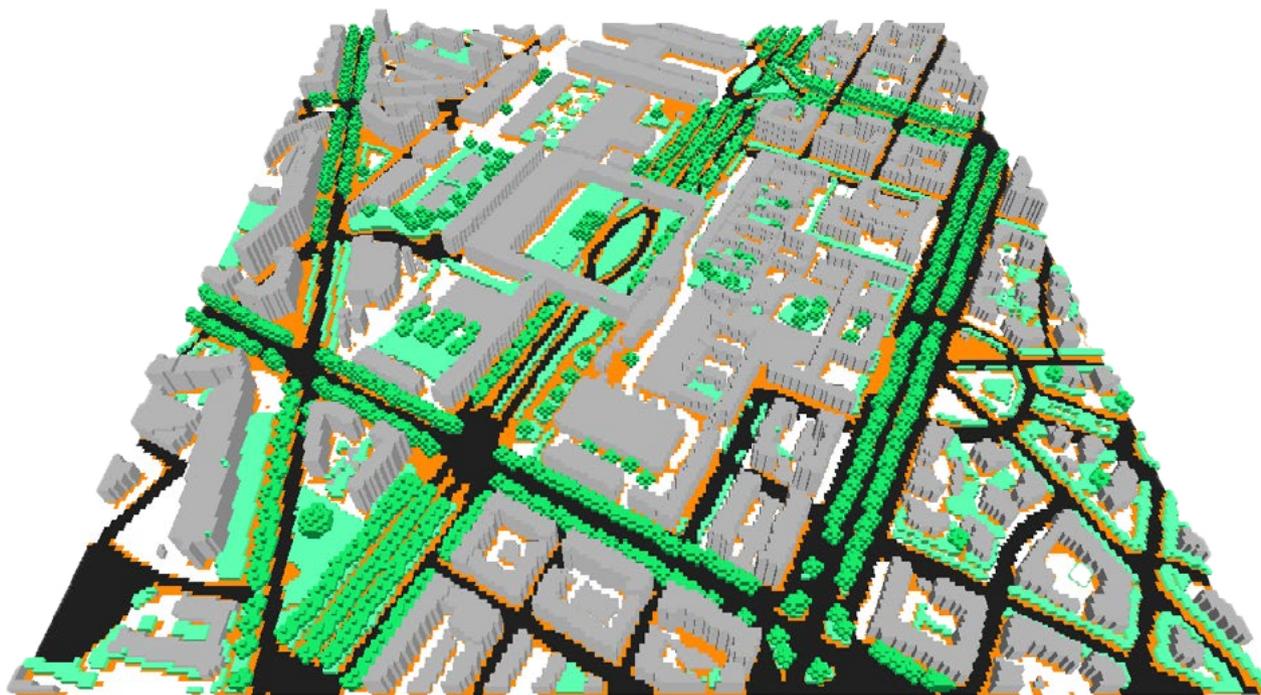


Figura 3.5.1 - Modello dell'area di masterplan estratto da Space

/04

**CASO STUDIO:
LA SEDE
CENTRALE DEL
POLITECNICO DI
TORINO**





0 500m



4.1 INTRODUZIONE

La scelta come caso studio è ricaduta sulla sede centrale del Politecnico di Torino e la cittadella in quanto rappresenta un esempio molto eterogeneo sia del patrimonio costruito, risalente a più periodi storici, sia della qualità degli spazi outdoor.

La città e il Politecnico

Attualmente l'area all'interno della quale si trova la città di **Torino** è fortemente urbanizzata e la superficie costruita è pari a 8418,35 ettari, che corrisponde al 65 % della superficie totale (Arpa, 2020) mentre il 35 % della superficie risulta permeabile (Arpa, 2020) e ospita 861.577 abitanti (ISTAT, 2022). Una città le cui caratteristiche morfologiche, come la disposizione delle sue strade e la vicinanza a catene montuose alte, portano alla concentrazione di sostanze inquinanti e livelli di inquinamento dannosi per la popolazione (Piano di Resilienza climatica di Torino, 2020). La città di Torino è una delle principali città del Nord Italia e ospita una delle più importanti università italiane, il Politecnico di Torino. Il **Politecni-**

co è un'istituzione di formazione e ricerca di livello internazionale, situato a sud del centro urbano, dove un tempo sorgeva il vecchio stadio comunale di Torino. L'edificio della sede centrale del Politecnico si estende su una superficie di circa 400.000 metri quadrati.

Pertanto le altre sedi satelliti del Politecnico diffuse sul territorio comunale, quali il castello del Valentino, Lingotto, la sede di Via Morgari e Mirafiori Sud non verranno interessate. Quest'istituzione universitaria ha un legame molto forte con la città di Torino e con il territorio regionale, poiché contribuisce allo sviluppo economico e sociale della regione attraverso la formazione di professionisti altamente qualificati e la conduzione di ricerche scientifiche di livello internazionale.

1. Figura 4.1.0 - Pianta della città di Torino e l'area attorno del Politecnico.

2. Figura 4.1.1 - Dettaglio della planimetria della città di Torino.

3. Figura 4.1.2 - Immagine del raddoppio del Politecnico.

4. Figura 4.1.3 Immagine del primo cortile sede centrale su C.so Duca degli Abruzzi.

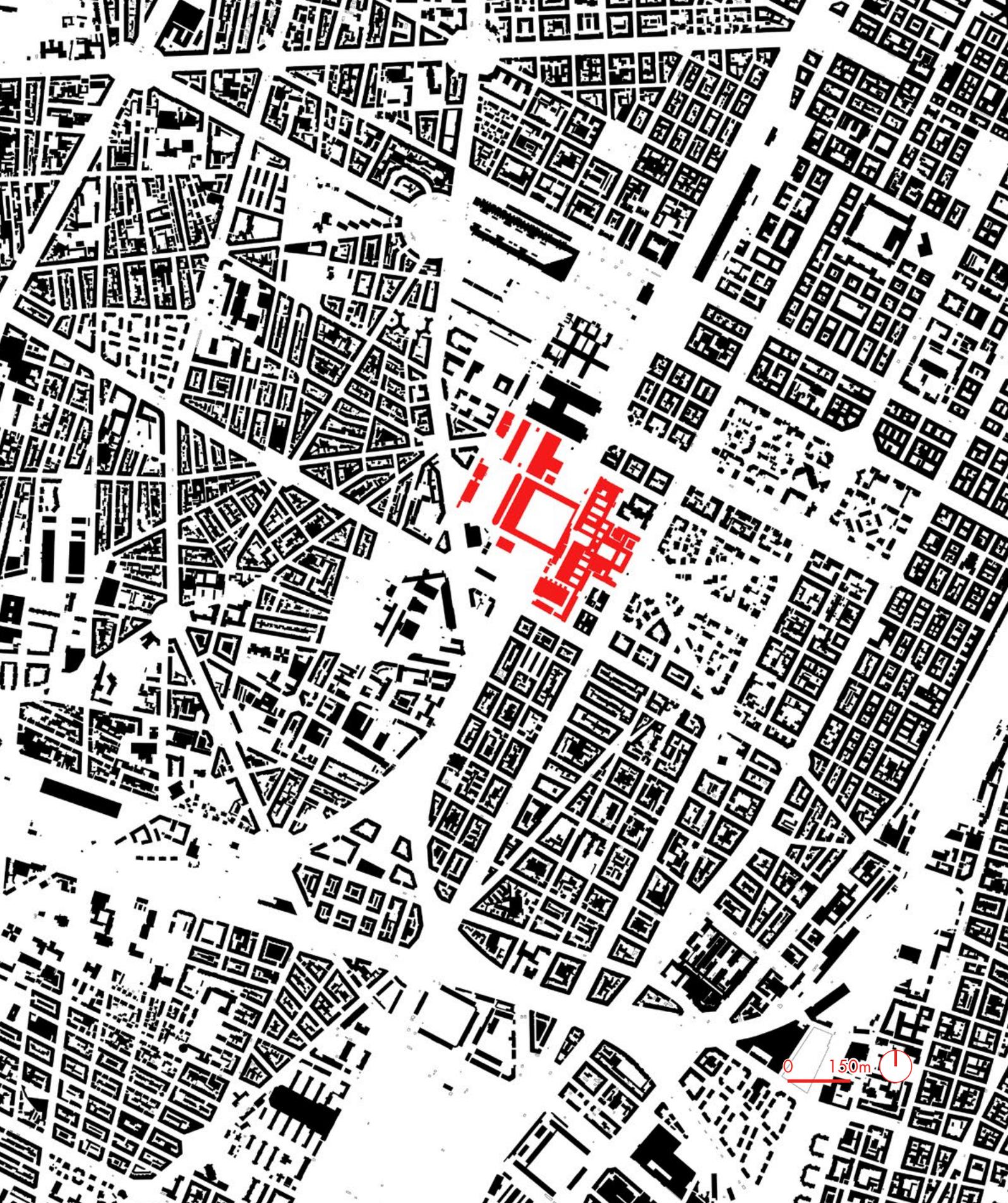


Figura 4.1.2



Figura 4.1.3



4.2 INQUADRAMENTO STORICO

L'università

Il Politecnico di Torino deve la sua costituzione all'unione di due istituzioni: la Regia Scuola di Applicazione per gli ingegneri, nata nel 1859, e il Regio Museo Industriale¹, fondato nel 1862. L'unione dei due Istituti dà origine, l'8 luglio del 1906, al Regio Politecnico. Fin dalla sua nascita, l'Ateneo è stato coinvolto nella crescita culturale, economica, sociale e urbana della città di Torino e del territorio piemontese. Sin dai primi anni di attività i due Istituti hanno collaborato per promuovere la cultura tecnica nazionale fino al 1906 si unirono per formare il Regio Politecnico, una nuova grande istituzione in grado di supportare lo studio di ogni ramo dell'ingegneria (Pugno, 1959). Con lo sviluppo dell'offerta formativa si comincia a riconoscere la necessità di nuovi spazi formativi. Già nel 1910 si proponeva di creare un'unica sede per l'Università e il primo passo verso la nuova sede del Politecnico risale al 1939, quando il regime fascista approvò il progetto per il nuovo Politecnico, nei pressi delle Molinette. Fu l'inizio di un percorso travagliato, fatto di

decisioni e ripensamenti, che passò anche attraverso i bombardamenti del 1942 dell'ex Regio Museo Industriale², dove oggi sorge Piazza Valdo Fusi, e arrivò irrisolto fino al secondo dopoguerra. Nella seconda metà degli anni Quaranta, quando al Castello del Valentino si concentrarono lezioni e laboratori, riprese l'idea di una nuova sede. Dopo qualche incertezza, l'area viene definitivamente individuata in quella dell'ex stadium comunale¹, tra corso Peschiera, Castelfidardo, Montevecchio e Duca degli Abruzzi (Giacomelli, 2010).

La Sede Centrale e la Cittadella poi

Si avviano così idee, progetti e concorsi, che porteranno alla realizzazione della sede di Corso Duca degli Abruzzi. Questo complesso di edifici verrà inaugurato nel 1958 e ampliato nei decenni successivi con la costruzione della Cittadella del Politecnico.

Origini

Dopo un ampio dibattito che ha ani-

1. Il Regio Politecnico di Torino è stato il primo Politecnico ad essere istituito in Italia e ha avuto un ruolo di grande rilievo nella formazione di professionisti altamente qualificati e nella conduzione di ricerche scientifiche di livello internazionale. Fonte: <https://www.museotorino.it/>

2. L'edificio, già sede del Ministero della Guerra e Convento delle convertite, divenne sede del Regio Museo Industriale Italiano nel 1865, tre anni dopo la costituzione dell'istituto. Fu distrutto dai bombardamenti nel 1943 e, in seguito, il grande vuoto urbano divenne piazza Valdo Fusi. Fonte: <https://www.museotorino.it/>

mato architetti e ingegneri torinesi per tutta la prima metà del Novecento sull'ubicazione della Regia Scuola Politecnica, nel 1950 iniziò la costruzione della nuova sede del Politecnico di Torino, sul terreno precedentemente occupato dallo Stadium (costruito per l'Esposizione del 1911, con una capacità di oltre 40.000 posti, venne demolito dopo la guerra). Il progetto della nuova sede dell'università è stato redatto dall'Ufficio Tecnico di Ateneo, con l'ausilio di una commissione di docenti - in particolare l'architetto milanese Giovanni Muzio (1893-1982) e dallo studio di progettazione della Fiat (Magnaghi et al., 1995).

Sviluppo

Negli anni Ottanta e Novanta, la necessità di nuovi spazi, portò all'ampliamento verso Corso Castelfidardo (Sisto Giriodi, Pier Giuseppe Bardelli, Renato Piramide, 1984-1992) e la "finestra urbana" lungo la manica su via Peano (Lorenzo Mamino, Pier Giuseppe Bardelli, Piero Amore, Luciano Luciani, 1984-1994), volume trasparente di raccordo verticale tra i piani. Nel

1995 inizia il raddoppio del Politecnico, con il progetto di estendere gli spazi dell'università oltre la linea ferroviaria. Quest'ultima con il progetto della Spina³ (progetto dello studio Gregotti Associati) interra il passante ferroviario direzione nord e la conseguente creazione di Corso Castelfidardo in superficie. La sede storica di Corso Duca degli Abruzzi diventa così finalmente collegata alla nuova Cittadella del Politecnico. Questo percorso di ampliamento intrapreso dalla fine degli anni '90 raggiunge nel 2009 la piena realizzazione del cosiddetto "raddoppio sull'area delle ex Officine Grandi Riparazioni ferroviarie", poi del "Progetto della Cittadella Politecnica" che prevedeva un aumento di spazi e attrezzature. Attraverso la rifunzionalizzazione di ex torni e fucine, oltre alla realizzazione di un cortile interrato, sono stati realizzati due cavalcavia su corso Castelfidardo, oltre a vari servizi tra cui parcheggi, una caffetteria e aule studio (Spinelli et al., 2008).

Masterplan di Ateneo

3. Il Passante Ferroviario, con l'interramento di oltre 7 km di binari, è il più grande intervento infrastrutturale realizzato a Torino dal dopoguerra. Il progetto ha consentito la ricucitura di due parti di città da sempre separate dalla ferrovia e la realizzazione della Spina Centrale, la "spina dorsale" dello sviluppo della città, fulcro dei principali interventi di trasformazione urbana.

La realizzazione del nuovo viale della Spina Centrale è stata l'occasione per progettare da zero - a favore della qualità ambientale e della vita dei residenti - la viabilità con la separazione dei flussi di transito: il grande asse di scorrimento al centro, i controviai a velocità moderata, la pista ciclabile, l'area di sosta, i marciapiedi e il verde. Fonte: <https://www.museo-torino.it/>

Nel 2017 nasce un nuovo progetto strategico: il masterplan di Ateneo che comprende un totale di oltre 400.000 m²(4). L'iniziativa cerca di coinvolgere gli attori locali nei progetti di sviluppo dell'Università, al fine di promuovere il coordinamento e la comunicazione tra tutte le parti coinvolte. Secondo il Politecnico di Torino, la pianificazione urbana può avere una serie di benefici positivi per la qualità complessiva della vita urbana, tra cui lo sviluppo economico, l'interazione sociale e l'arricchimento culturale. Il dibattito sul futuro dei due principali campus universitari nel 2018 si è esteso oltre le mura dell'ateneo. Il campus del Dipartimento Centrale di Ingegneria del Politecnico di Torino si estende da corso Duca fino al limite dell'area ex Westinghouse. L'area adiacente al Castello del Valentino, invece, ospiterà i dipartimenti di architettura, pianificazione e design dell'università. Gli interventi promossi dal Masterplan sono orientati alla ricentralizzazione, con particolare attenzione alla riorganizzazione e all'ampliamento dei siti storici e alla strutturazione delle attività attor-

no a due poli principali dislocati in aree diverse della città (uno per le discipline ingegneristiche e uno per l'architettura, l'urbanistica e il design). La progettazione di questi nuovi spazi ha coinvolto esperti, professionisti, docenti di altre università, nonché rappresentanti della pubblica amministrazione e delle istituzioni interessate. L'ampliamento dei due campus è un investimento per lo sviluppo futuro della città di Torino e la trasformazione di queste due aree centrali è fondamentale per le prospettive di crescita della città. Il Campus di Ingegneria del Politecnico si trova lungo la Spina 2, al centro dell'ottocentesca "Cittadella dei servizi" che ha subito una lunga trasformazione in "Cittadella della conoscenza" a partire dalle prefigurazioni del Piano Regolatore del 1995. Il campus si trova in un'area con un forte patrimonio industriale, rappresentato dalle ex Officine Grandi Riparazioni⁵. Il progetto di espansione e riorganizzazione del Politecnico è dunque centrale per lo sviluppo di questo settore urbano come nuovo fulcro lungo la Spina, dove il rapporto con la città si con-

4. Le superfici delle sedi nella città di Torino sono così suddivise: 237.916 mq presso la sede Centrale e la Cittadella, 23.300 mq del Campus Valentino, 13.400 al Lingotto e 8.200 mq a Mirafiori. Fonte: Masterplan di Ateneo.

solida con i grandi contenitori di cultura delle OGR, le Carceri Nuove, ei nuovi cantieri nel settore nord dell'Energy Center e dell'Ex-Westinghouse. Il Campus di Architettura si trova sull'asse lungo il fiume Po, in una posizione strategica e portare in quest'area le attività di ricerca e didattica per le discipline dell'Architettura, dell'Urbanistica e del Design, attualmente distribuite nelle quattro sedi urbane, significa ampliare notevolmente gli spazi utilizzati dal Politecnico, investendo nella valorizzazione dell'area come nuovo polo nel sistema culturale della città, capace di legare, in una singolare cornice ambientale, presenze di eccezionale valore paesaggistico e architettonico nazionale - compresi i padiglioni di Torino Esposizioni (Politecnico di Torino, 2018).

5. Le Officine Grandi Riparazioni (OGR) sono un complesso industriale situato nella zona nord-est della città di Torino. Le OGR sono state costruite alla fine dell'Ottocento per ospitare le attività di riparazione e manutenzione delle locomotive della rete ferroviaria italiana. L'edificio principale delle OGR di Torino, che si estende su una superficie di circa 50.000 metri quadrati, è stato dichiarato monumento nazionale nel 1989. Fonte: <https://www.museotorino.it/>

6. Figura 4.2.1. Immagine del vecchio stadio comunale presente sull'attuale sedime del Politecnico. Fonte: <https://www.museotorino.it/>

7. Figura 4.2.2. Immagine del cantiere dell'università, anni '30 del '900. Fonte: <https://www.museotorino.it/>

8. Figura 4.2.3. Cortile principale e aula magna della sede centrale.

9. Figura 4.2.4. Immagine del parcheggio adiacente alle aule P.

10. Figura 4.2.5. Assonometria dello stato di fatto

11. Figura 4.2.6. Assonometria del masterplan di progetto

S. A. E. S. SOCIETÀ ANONIMA ESERCIZIO STADIUM



- 1 - Saloni Automobili.
- 2 - Bozze (Società Ginnastica Subalpina)
- 3 - Skating Club
- 4 - Buffets e Restaurants
- 5 - Garages coperti per auto e moto
- 6 - Salone d'Onore
- 7 - Tennis
- 8 - Salone Mostre varie
- 9 - Spogliatoi e docce per Footballers (U. S. Torinese)
- 10 - Dormitori per squadre e Società Sportive
- 11 - Campo internazionale Football
- 12 - Campo allenamento Football (U. S. Torinese)
- 13 - Patinoir (mq. 12.000)
- 14 - Pista ippica
- 15 - Pista ciclistica-motociclistica e per automobili
- 16 - Campi per tennis e giochi di bocce
- 17 -

Veduta presa da aeroplano pilotato dall' "asso.", Brak Papa (Fotogr. Goppelli)

Stadium Nazionale Torino, 100.000 mq. di superficie occupata: 15.000 mq. terrenò coltivato a giardino - 10.000 mq. locali coperti

Spogliatoi e dormitori per oltre 5.000 ginnasti - Oltre 40.000 posti a sedere

Figura 4.2.1



Figura 4.2.2

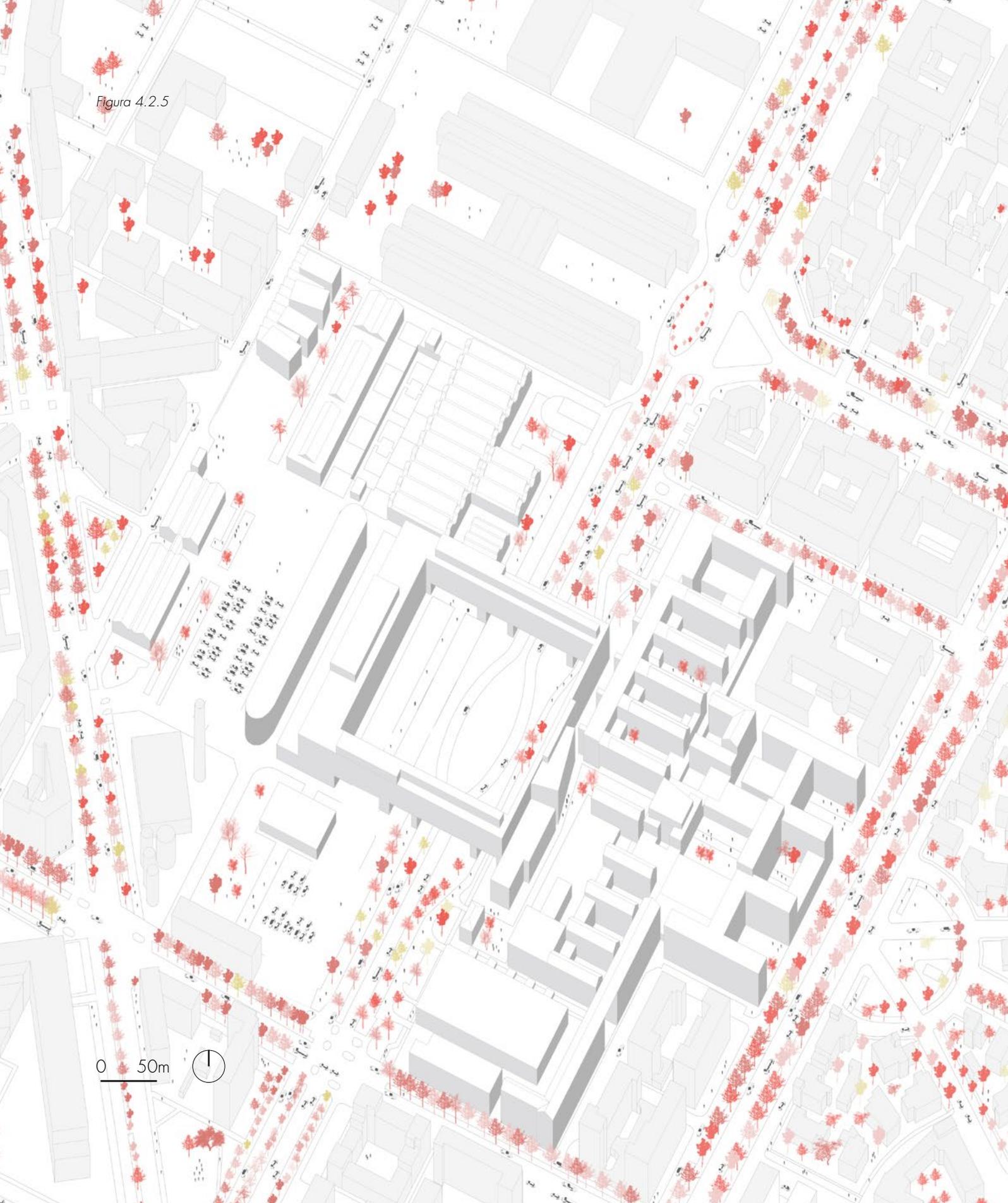


Figura 4.2.3



Figura 4.2.4

Figura 4.2.5



0 50m



Figura 4.2.6



4.3 INQUADRAMENTO CLIMATICO

Clima

Secondo la classificazione dei climi di Köppen, Torino appartiene alla fascia Cfa: clima temperato umido delle medie latitudini con estate calda (mediamente i 30 °C sono raggiunti e superati 15 giorni all'anno a Torino e la media di luglio si attesta intorno ai 23 °C). Dagli anni novanta in poi l'estate torinese ha subito un riscaldamento. Gli inverni risultano moderatamente freddi, asciutti e spesso soleggiati.

Anche a Torino si osservano cambiamenti del clima locale: dove eventi estremi e intensi sono sempre più frequenti e con una maggiore variabilità. Come riportato nel piano di resilienza climatica della città, gli impatti dei cambiamenti climatici stanno diventando più evidenti. Si sono verificati fenomeni estremi in aumento, in particolare ondate di calore e inondazioni che hanno causato ingenti danni economici alle città. Le aree urbane sono particolarmente vulnerabili a questi fenomeni e gli effetti sulla salute delle ondate di calore, che includono un aumento del tasso di mortalità e morbilità nonché una maggiore inci-

denza di allergie e la diffusione di malattie respiratorie, possono colpire un ampio bacino di persone. Le ondate di caldo incidono poi sulla gestione del verde urbano e sulla disponibilità idrica e sui consumi energetici e il funzionamento di alcune attività industriali (Piano di Resilienza climatica di Torino, 2020).

I dati raccolti sulle temperature a Torino dal 1951 (Figura 4.3.1) ad oggi mostrano un aumento significativo sia delle temperature massime che delle temperature medie, mentre le temperature minime sono rimaste stazionarie o in lieve calo. Questa tendenza è particolarmente evidente negli ultimi 30 anni, con un aumento stimato di 0,8°C ogni 10 anni. Considerando le temperature massime, le anomalie sono positive dal 1988 e mostrano una marcata tendenza al rialzo di 2,2°C negli ultimi 60 anni. Le temperature minime hanno mostrato un trend leggermente negativo, anche se non statisticamente significativo. Questa tendenza degli ultimi anni ha determinato un aumento della variabilità meteorologica, con temperature minime più basse e temperature massi-

me e medie più elevate. Riguardo queste ultime il grafico 4.3.2 mostra le anomalie per il periodo 1989-2020, ossia la differenza tra valori annuali e la media del periodo, in riferimento ai valori di temperature medie (espresse in °C). La temperatura media (Figura 4.3.2) è aumentata di circa 0.15°C ogni 10 anni. Negli ultimi quindici anni in particolare, si osserva come la temperatura media sia stata sempre sopra la norma rispetto al ventennio anni prima di riferimento (1989-2009) per un aumento complessivo stimato di circa 1°C in 50 anni (Mercogliano, 2020). L'analisi delle anomalie della temperatura media annuale mostra una tendenza positiva, con anomalie positive soprattutto nei primi anni del nuovo millennio (Arpa, 2020).

Attraverso gli indicatori climatici si analizzano alcune specifiche caratteristiche del clima della città.

Gli indicatori considerati per quanto riguarda la temperatura sono tre:

Notti calde: Indica il numero di giorni con temperatura minima maggiore di 20°C. Si tratta di un valore molto importante per valutare l'im-

patto dei cambiamenti climatici sul benessere fisico delle persone.

Giorni molto caldi: Indica il numero di giorni in cui la temperatura massima giornaliera supera i 25°

Questi due indicatori sono importanti per lo studio degli impatti dei cambiamenti climatici sulla salute delle persone e sui consumi energetici per il raffrescamento degli ambienti.

Giorni freddi: Il numero dei giorni in cui la temperatura scende sotto 0°C.

Il grafico che riporta l'andamento annuale degli indicatori si vede come le notti calde e giorni molto caldi seguono una crescita nel periodo 1989-2020, mentre giorni freddi non mostrano un trend statisticamente significativo (Piano di Resilienza climatica di Torino, 2020).

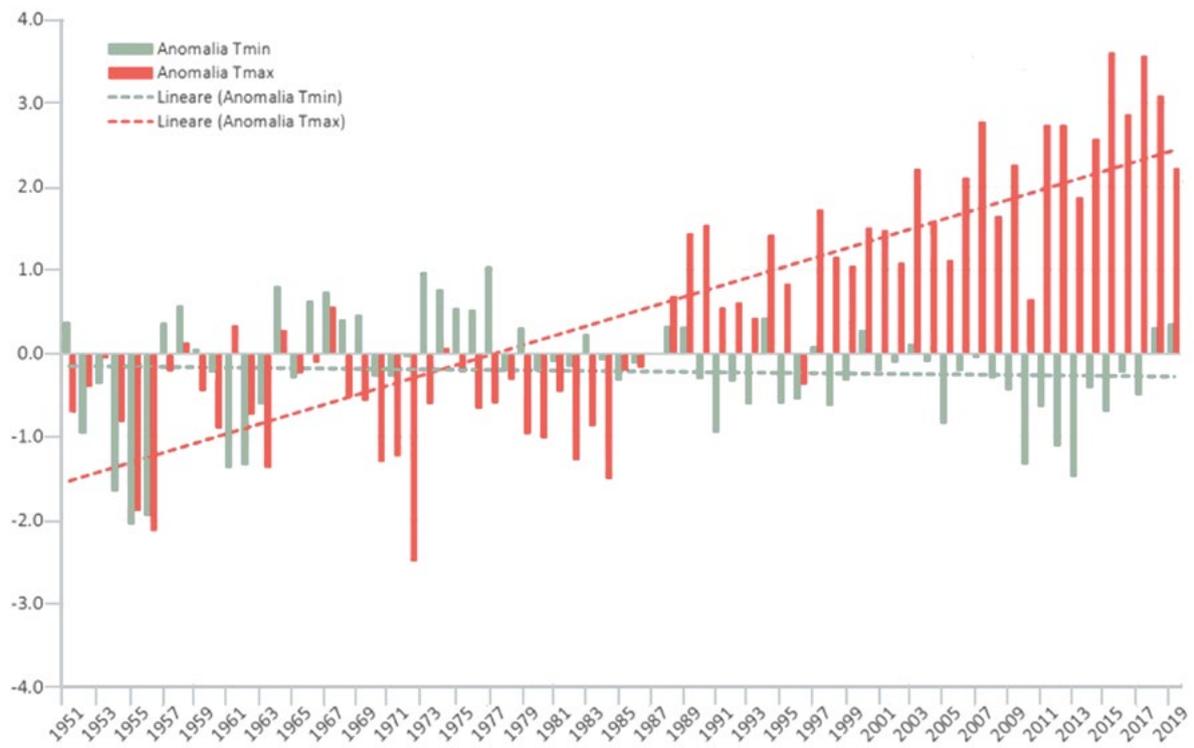


Figura 4.3.1 - Anomalia della temperatura massima (in rosso) e minima (in blu) annuale a Torino dal 1951 al 2019 (rielaborazione da Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici, 2020).

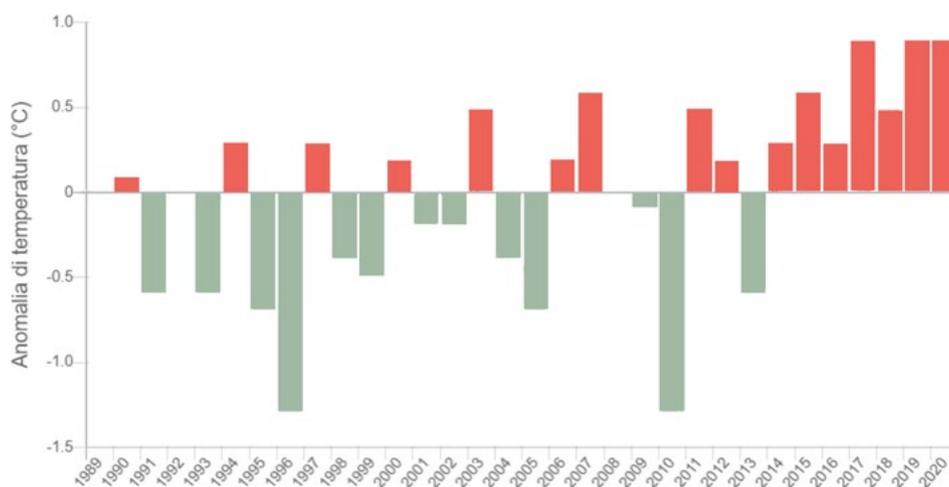


Figura 4.3.2 - Andamento dell'anomalia annuale di temperatura media calcolata rispetto alla temperatura annuale media sul periodo 1989-2020. (rielaborazione Mercogliano, Padulano, Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici, 2020).

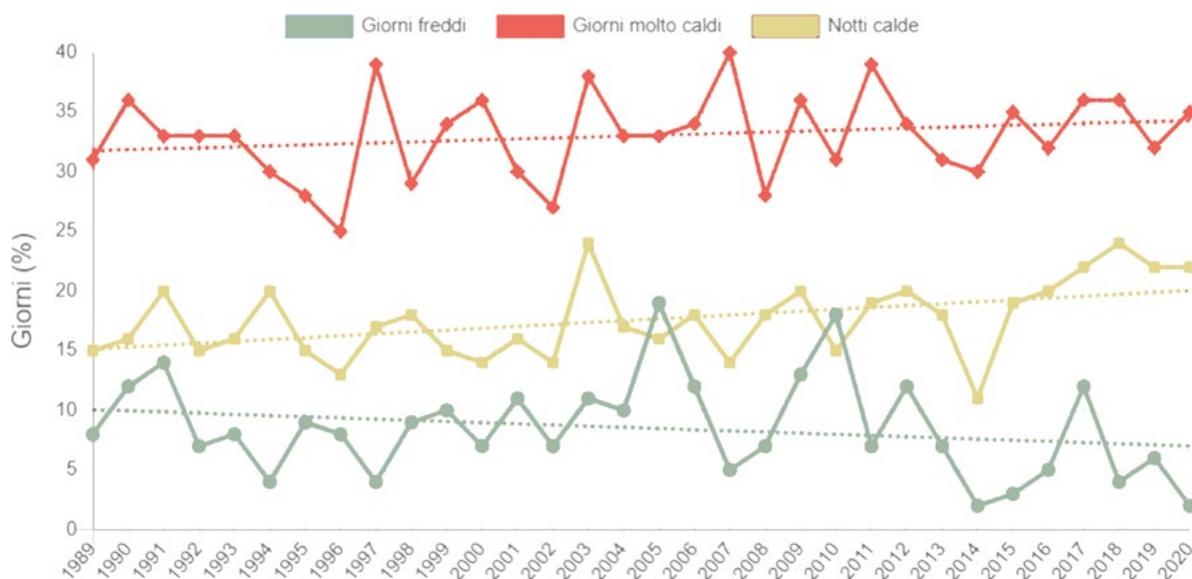


Figura 4.3.3 - Andamento annuale (percentuali di giorni l'anno) per gli indicatori che nel testo sono descritti come giorni freddi (frost days, FD), notti calde (tropical nights, TR) e giorni molto caldi (summer days, SU) (rielaborazione Mercogliano, Padulano, Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici, 2020).

4.3.1 ISOLA DI CALORE A TORINO

UHI

Dalle analisi condotte dall'Arpa Piemonte è emerso che la maggior parte del tessuto urbano della città si trova nella zona di moderata pericolosità, mentre le zone di alto rischio si concentrano attorno ai due grandi gruppi di edifici industriali: il complesso Fiat a sud-ovest e il complesso IVECO a nord-est. Questa analisi ha rivelato che, entro una distanza di 50 metri dagli edifici industriali, le temperature medie durante determinati eventi di caldo estremo sono superiori di 3°C rispetto alla media cittadina, fino a 1°C ad una distanza compresa tra 50 e 100 metri. Il documenti redatti da Arpa evidenziano una significativa tendenza al rialzo sia delle temperature massime che delle temperature medie. Dall'analisi dei CAAP (Company Adaptation Action Plan) è emerso che tra i pericoli a cui le persone sono maggiormente esposte nell'aree a basso e alto rischio ci sono le temperature estreme. Considerando che le aree industriali sono quelle che si trovano maggiormente nelle aree ad alto rischio, sono state sviluppate ulteriori analisi per capire come queste aree

e le temperature ad esse correlate possano influenzare anche le aree limitrofe.

- il 27% del territorio ricade in un'area con un basso rischio isola di calore;
- il 44% del territorio ricade in un'area con un medio rischio isola di calore;
- il 2% del territorio ricade in un'area con un elevato rischio isola di calore.

La mappa (Figura 4.3.1.1) mostra che le parti del territorio a rischio zero o a basso rischio rispetto alle isole di calore sono concentrate in aree verdi o ad esse adiacenti, oltre che in prossimità di viali alberati. Ciò evidenzia come la vicinanza alle infrastrutture verdi possa mitigare l'esposizione al rischio. Analogamente si evince che le aree a rischio medio e alto si concentrano prevalentemente in aree urbanizzate e quindi impermeabili. In particolare, l'area pianeggiante è la parte più densamente edificata della città e, quindi, più esposta a fenomeni di isole di calore urbane. Le aree più critiche sono le aree industriali, che spesso rappresentano grandi spazi

privi di infrastrutture verdi con grandi superfici impermeabili.

Attualmente, il territorio dell'area urbana di Torino risulta fortemente urbanizzato. La quantità di suolo consumato è infatti pari a 8418.35 ettari, il quale corrisponde al 64.69% della superficie totale (Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente, 2020).

Negli ultimi anni, gli effetti derivanti dagli impatti del cambiamento climatico sono stati sempre più evidenti. Si sono verificati crescenti fenomeni estremi, nello specifico ondate di calore ma anche alluvioni (Legambiente, 2020) che hanno causato ingenti danni alla città, alla popolazione e alla sua economia (Arpa, 2020). Secondo l'ISTAT, le temperature massime in città sono aumentate di 2,04°C nel 2018 rispetto al periodo di riferimento 1971-2000. L'ISTAT segnala anche un probabile aumento del numero di notti tropicali durante la stagione estiva 2018, con un incremento del 12,9 rispetto alla media del periodo di riferimento. Tali stime sono coerenti con quanto riportato nel Piano di Vulnerabilità della città, dal quale

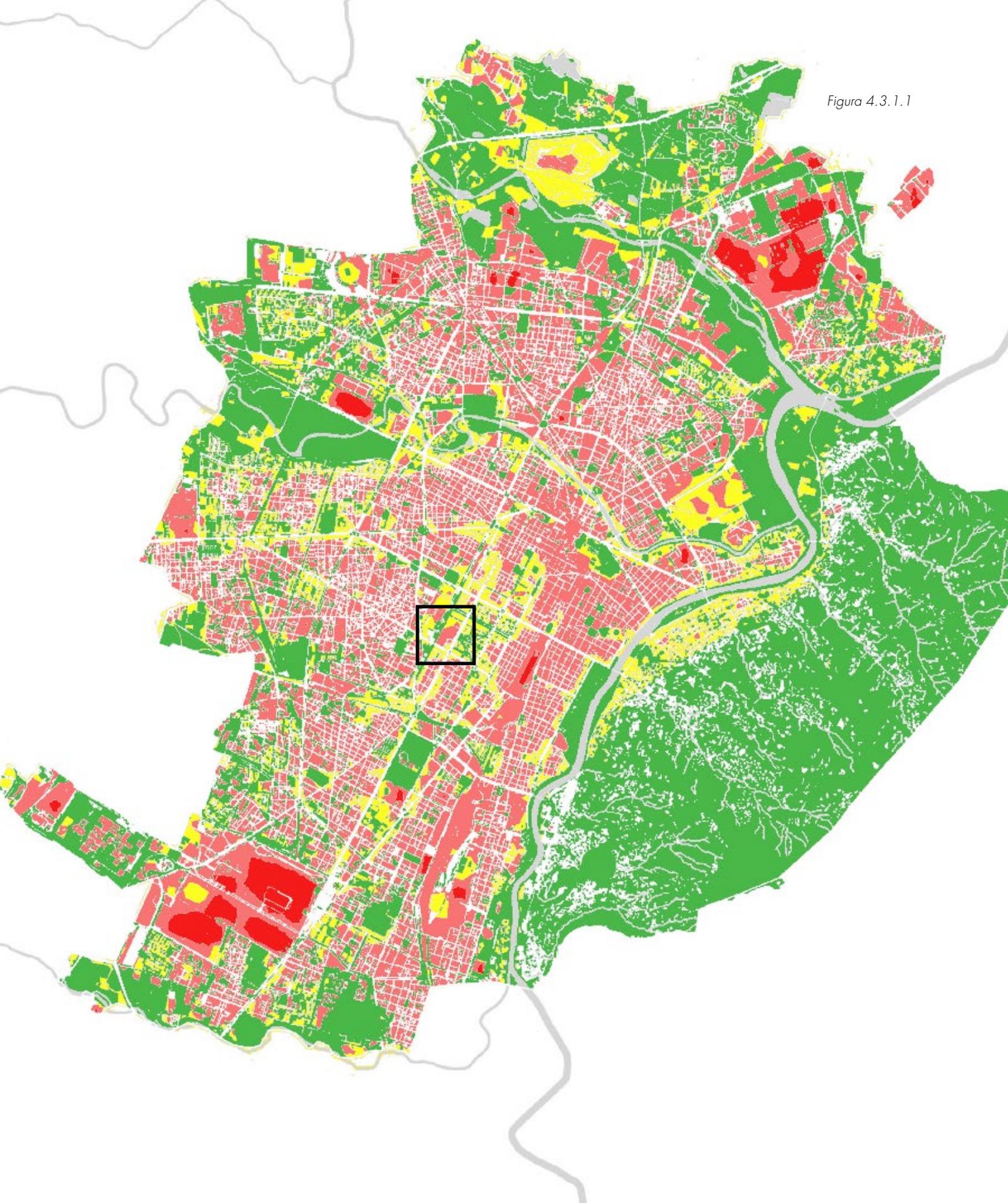
si evince che l'andamento della temperatura è stato positivo negli ultimi 30 anni, con incrementi particolarmente significativi durante le stagioni estive. La presenza di Urban Heat Islands (UHI) è strettamente legata a questa tendenza. Si stima che le ondate di calore aumentino con il riscaldamento globale e l'effetto combinato delle caratteristiche termiche e radiative delle aree urbanizzate. Ciò porta a temperature estreme molto elevate e alla mancanza di raffreddamento notturno. I potenziali effetti sulla salute sono favoriti dagli alti valori di concentrazione di ozono e biossido di azoto che spesso accompagnano questi fenomeni. Questi effetti saranno sempre più significativi. Infatti, uno dei rischi più facilmente prevedibili in relazione alla salute della popolazione è quello associato alla frequenza delle ondate di calore e alla loro durata. Le ondate di calore sono un fenomeno naturale che provoca situazioni di emergenza pubblica, come nell'estate del 2003. Inoltre provocano impatti rilevanti e misurabili sulla salute, anche quando si manifestano in modo meno grave.

Strettamente correlato alle ondate di calore è infatti il fenomeno delle isole di calore urbane (UHI). Ciò consiste in un aumento significativo della temperatura nelle aree urbane rispetto alle aree rurali circostanti. Le escursioni termiche notturne non di rado raggiungono i 5-6 °C. Questo fenomeno è causato dalla maggiore capacità delle aree urbane di catturare la radiazione solare e conservare il calore durante il giorno e rilasciarlo durante la notte. È causato principalmente dalle caratteristiche termiche e radiative dei materiali che compongono le superfici urbane (asfalto e cemento in primis), in cui l'assorbimento della radiazione solare prevale sulla riflessione. L'UHI è più evidente di notte quando le città sono più calde delle aree rurali circostanti. Pertanto, questo fenomeno fa sì che le popolazioni urbane siano maggiormente a rischio in relazione alla salute e all'emergenza pubblica. rischio durante le ondate di calore. La figura mostra come le aree dove il rischio di UHI è particolarmente elevato corrisponde ai grandi insediamenti industriali e ai tracciati delle ferrovie, buona parte

della città di Torino, come già accennato, ha medie probabilità che le isole di calore urbane avvengano (44 %). L'area che comprende il politecnico e le immediate vicinanze ricade nel 44% sopraccitato (Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza - Regione Piemonte, 2022).

1. Figura 4.3.1.1 le parti del territorio della città di Torino e i rischi rispetto alle isole di calore. Fonte: <https://www.cmcc.it/it/report-torino-2022>

Figura 4.3.1.1



4.3.2 QUALITÀ DELL'ARIA A TORINO

L'analisi dei dati di qualità dell'aria a Torino mostra che la città è esposta ad alti livelli di inquinamento atmosferico, in particolare per quanto riguarda le particelle sottili (PM10 e PM2,5) e l'ozono troposferico.

Torino è una delle città più colpite dall'inquinamento atmosferico in Italia. L'inquinamento dell'aria è principalmente causato dal traffico urbano e dalle attività industriali nella zona. Gli alti livelli di polveri sottili, ossidi di azoto e di zolfo possono causare gravi problemi di salute come malattie polmonari, asma e malattie cardiovascolari. Per questo motivo, le autorità cittadine stanno attuando politiche e misure per ridurre l'inquinamento, come l'introduzione di autobus elettrici, la promozione dell'uso della bicicletta e la riduzione dell'uso di autovetture. Inoltre, la città sta investendo nell'energia pulita e nelle fonti di energia rinnovabile per ridurre le emissioni di gas a effetto serra.

Il particolato atmosferico, parametro che terremo in considerazione nella ricerca, è una miscela complessa di sostanze che possono avere caratteristiche e dimensioni molto diverse.

Possono variare da pochi nanometri a decine di micrometri. Sono generalmente identificate come particelle ultrafini (quelle con diametro aerodinamico inferiore a $0,1 \mu\text{m}$), particelle fini (quelle con diametro aerodinamico inferiore a $1 \mu\text{m}$) o particelle grossolane (quelle con diametro aerodinamico superiore a $1 \mu\text{m}$). Dal punto di vista della salute, vengono classificati diversamente a seconda del livello di profondità che riescono a raggiungere all'interno degli organi del corpo umano. Il PM10, detto anche frazione inalabile, identifica le particelle con diametro aerodinamico inferiore a $10 \mu\text{m}$ che sono in grado di raggiungere, attraverso le vie respiratorie, la trachea e i bronchi. Il PM2.5 rappresenta particelle con diametro aerodinamico inferiore a $2,5 \mu\text{m}$ che possono raggiungere anche gli alveoli polmonari (Arpa Piemonte, 2022).

2. Figura 4.3.2.1 Immagine di uno dei parcheggi a raso della Cittadella.

Figura 4.3.2.1



4.4 ANALISI DEL COSTRUITO- STATO DI FATTO

Il patrimonio immobiliare della sede centrale di ingegneria è frutto dell'evoluzione nel corso degli anni del sito scelto per l'università. Il nucleo centrale, inaugurato nel 1958 e di stampo funzionalista, è confingurato da stecche di 4,5 o 6 piani che vanno a definire le varie corti interne, dove trovano anche spazio le piastre che ospitano alcuni dei laboratori. Vi è rigorosità quanto nelle proporzioni quanto per la continuità dei materiali utilizzati, esito è un complesso «scolasticamente funzionalista», dall'impianto assiale, rigido nell'articolazione dei percorsi e gerarchico nella distribuzione degli spazi. Negli anni ottanta e novanta si realizzano l'ampliamento verso corso Castelfidardo e la «finestra urbana» lungo la manica su via Pe-

ano. Vi è quindi nell'ala Est, una omogeneità nelle forme, esclusivamente parallelepipedi, seppur mantenendo eterogeneità delle altezze. La costruzione del collegamento su C.so Castelfidardo iniziata nel 1995 crea il collegamento fisico con quella che diventerà la cittadella, con due bracci di oltre 20 metri di altezza. La zona Ovest, consente il raddoppio della sede, ma connotata da moltissima eterogeneità del costruito. Si va delle officine ottocentesche recuperate a quelle di inizio novecento fino alle aule più recenti interrato, al parcheggio multipiano. e alla piastra di aule temporanee P. La superficie dei due lotti corrisponde a circa 150.000 m² e il rapporto di copertura della superficie fondiaria è del 46 per cento.

1. Figura 4.4.2. Le morfologie del costruito.

2. Figura 4.4.3 Demoliti/costruiti

3. Figura 4.4.4 Assonometria completa dello stato di fatto del Politecnico.

4. Figura 4.4.5 Planimetria dello stato di fatto del Politecnico.

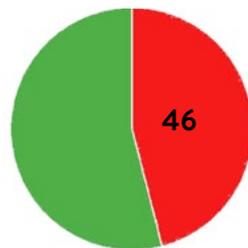
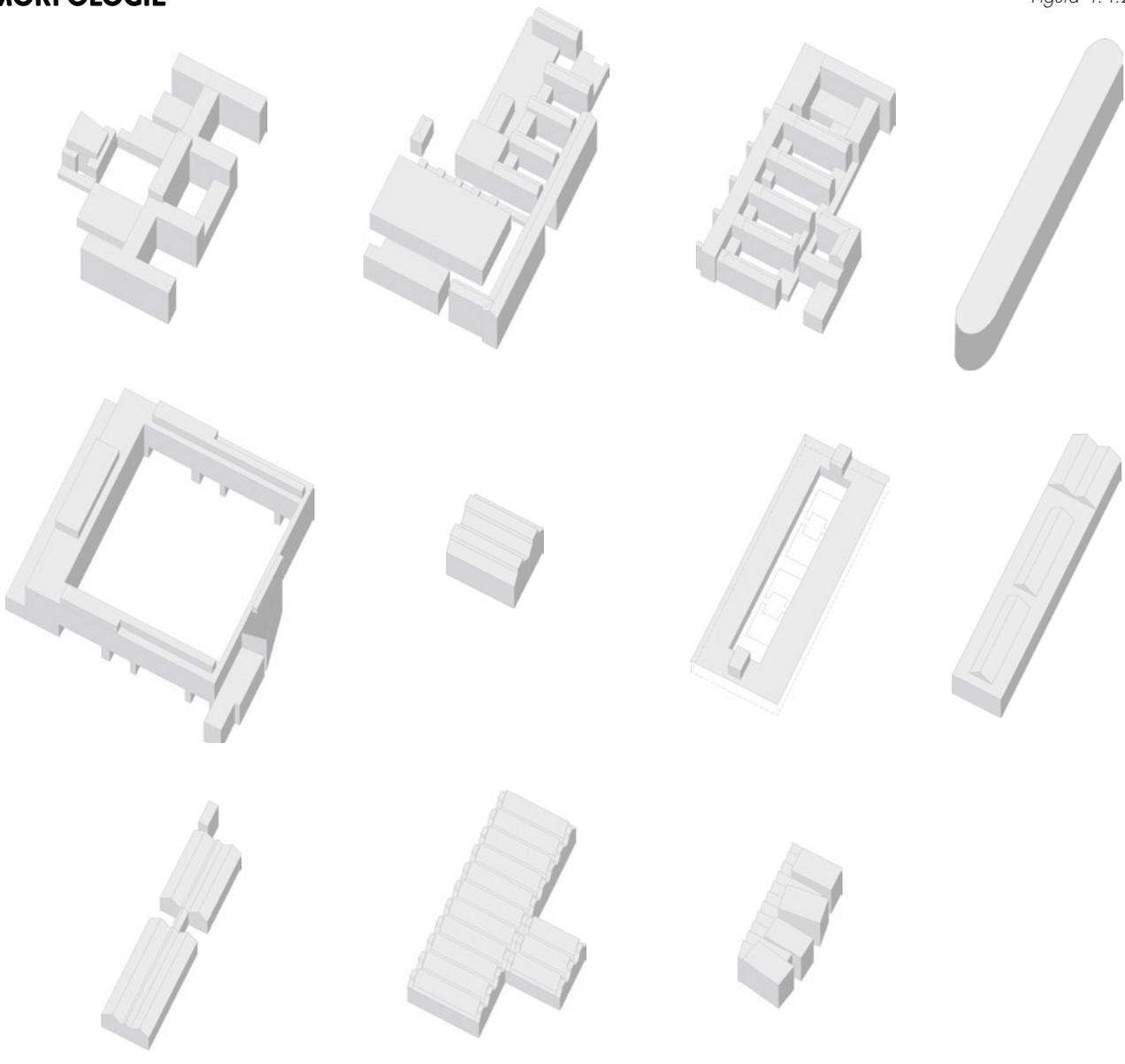


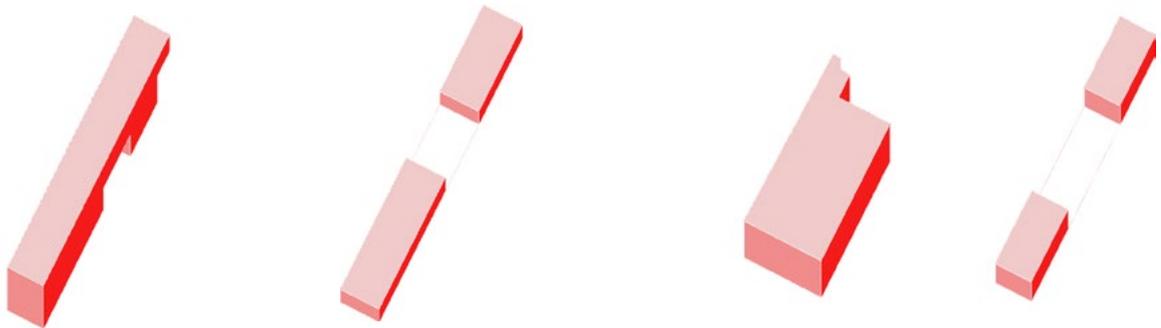
Figura 4.4.1 - Rapporto di copertura superficie fondiaria stato di fatto

MORFOLOGIE

Figura 4.4.2



**NUOVI EDIFICI
MASTERPLAN**



DEMOLITO-COSTRUITO

Dalla mappa dei giallo-rossi (Figura 4.4.3) emerge come la quasi totalità degli interventi edili importanti siano posizionati nella cittadella del Politecnico. L'assonometria qui a fianco riporta infatti solo i grossi progetti tralasciando i piccoli interventi di densificazione della vegetazione o cambio della pavimentazione che sono previsti nella parte storica. È evidente come la superficie occupata dal parcheggio nella parte Ovest del Politecnico sia molto vasta in rapporto all'estensione del lotto. Salta all'occhio come la parte Est fosse già satura di volumi e quindi impossibile sarebbe stato un ulteriore aumento di volume.

Figura 4.4.3



0 50m



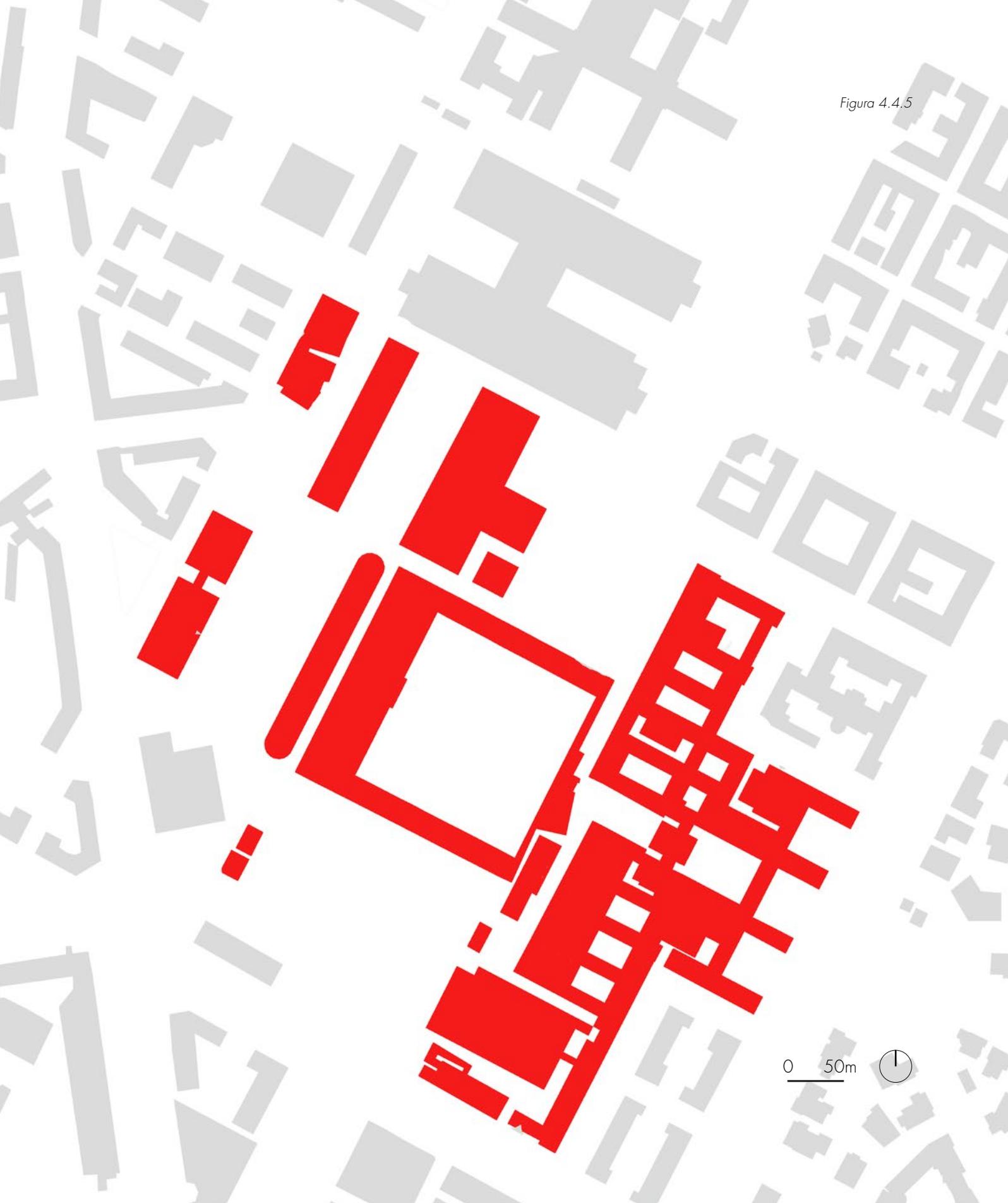
Figura 4.4.4



0 50m

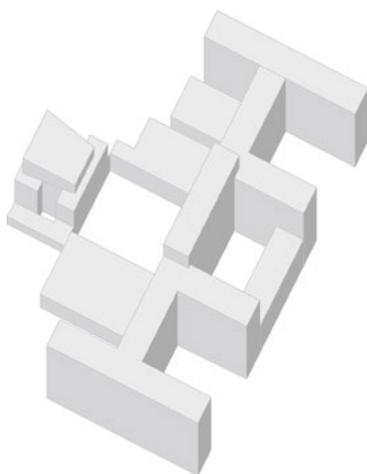


Figura 4.4.5



0 50m





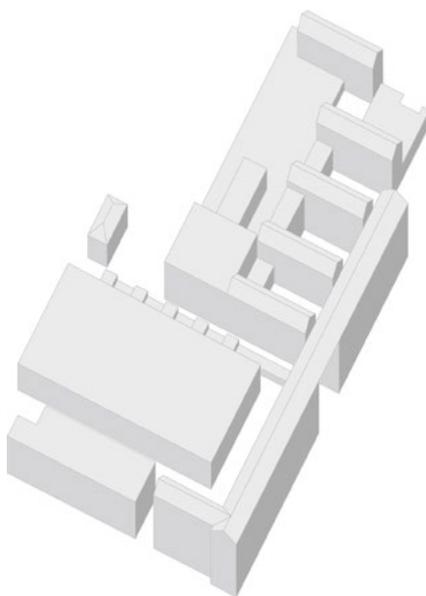
PRIMO NUCLEO

Nucleo originare dell'università, ospita aule e l'auditorium

Superficie coperta: **8.600 m²**

Piani fuori terra: **da 1 a 5**

Anno di costruzione: **1958**



AMPIAMENTO SUD

Prima fase di ampliamento della sede verso sud, ospita uffici, aule e ampi laboratori

Superficie coperta: **11.300 m²**

Piani fuori terra: **da 1 a 5**

Anno di costruzione: **1980-85**

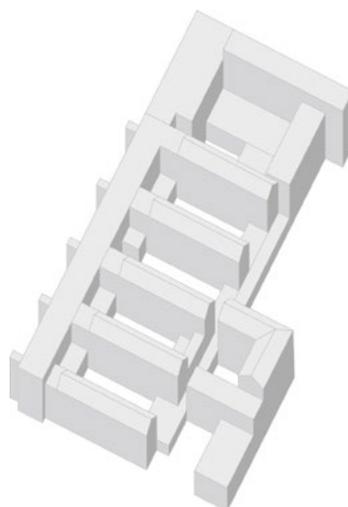
AMPIAMENTO NORD

Prima fase di ampliamento della sede verso Nord, ospita uffici, aule e piccoli laboratori

Superficie coperta: **7.300 m²**

Piani fuori terra: **da 2 a 5**

Anno di costruzione: **1980-85**



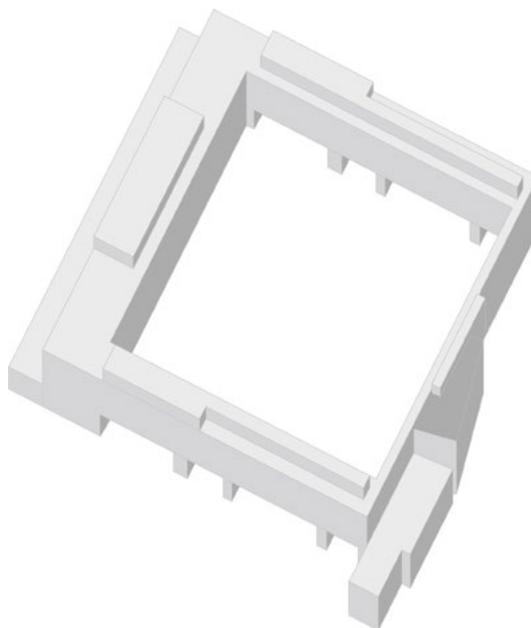
GLI SCAVALCHI

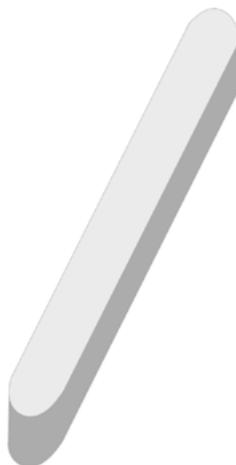
Nuova fase di espansione verso Ovest, sovrappasso su ex trincea ferroviaria. Ospita aule studio uffici universitari e di terzi

Superficie coperta: **12.300 m²**

Piani fuori terra: **6**

Anno di costruzione: **anni 2000**





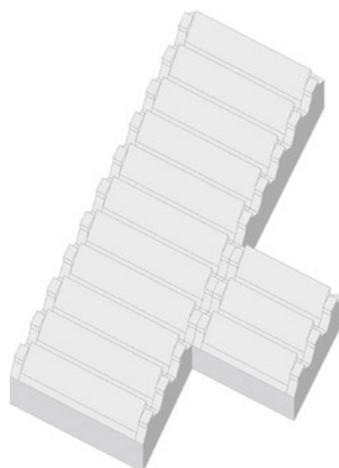
PARK MULTIPIANO

Parcheggio multipiano

Superficie coperta: **3.100 m²**

Piani fuori terra: **4**

Anno di costruzione: **2021-22**



AULE T / MENSA

Recupero officine ferroviare del
1800 in aule e mensa

Superficie coperta: **7.700 m²**

Piani fuori terra: **da 1 a 2**

Anno di ristrutturazione: **anni 2000**

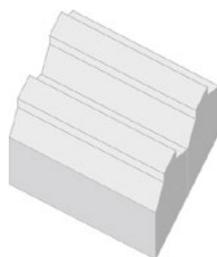
MIXTO

Nuovo edificio in vetro per la
caffetteria

Superficie coperta: **650 m²**

Piani fuori terra: **2**

Anno di costruzione: **anni 2000**



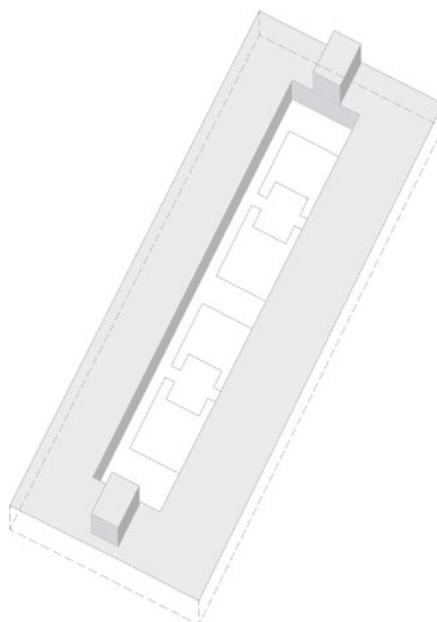
AULE I

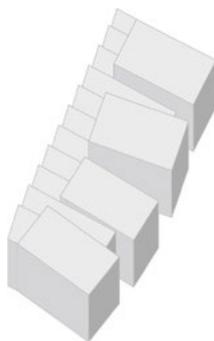
Aule e corte interrate

Superficie coperta: **3.000 m²**

Piani fuori terra: **0**

Anno di costruzione: **anni 2000**





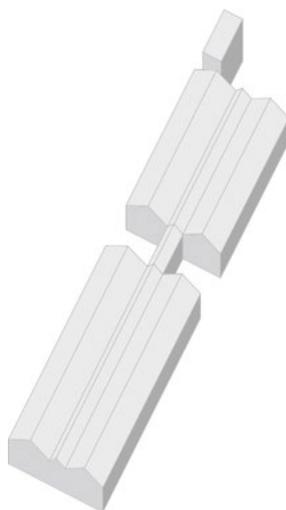
AULE R

Recupero di parte di un vecchio edificio e costruzione di nuove aule

Superficie coperta: **2.600 m²**

Piani fuori terra: **2**

Anno di costruzione: **anni 2021**



AULE M / N

Riconversione edificio dei primi anni del 1900 in aule e Laib

Superficie coperta: **3.900 m²**

Piani fuori terra: **2**

Anno di costruzione: **anni 2000**

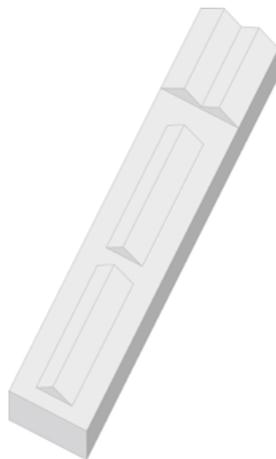
INCUBATORE

Recupero edificio ottocentesco,
occupato da incubatore per start
up

Superficie coperta: **3.300 m²**

Piani fuori terra: **1**

Anno di costruzione: **anni 2000**



4.4.1. ANALISI DEGLI SPAZI OUTDOOR

Gli spazi esterni del Politecnico di Torino sono caratterizzati da una combinazione di ampie aree verdi, parcheggi, edifici accademici e amministrativi.

L'area circostante al Politecnico è in realtà gran parte coperta da parcheggi e strade, che facilitano l'accesso all'università e da spazi verdi con varie destinazioni d'uso.

Gli spazi outdoor del Politecnico comprendono tutte le corti, i parcheggi e le zone verdi dell'università e corrispondono al 54 per cento della superficie totale del lotto ovvero a circa 81.000 m². Essi si possono suddividere per tipologia di pavimentazione, se siano o meno permeabili, in base alla destinazione d'uso e alla fruibilità. Per il 18 per cento questi spazi sono permeabili e vi è presenza di prato e vegetazione, il restante 82 per cento e a sua volta suddiviso in 62 per cento di asfalto e il restante 38 per cento ha altra pavimentazione lapidea.

Allo stato di fatto per la maggior parte delle superfici esterne si tratta di superfici impermeabili adibite e strade, parcheggi e corti. L'elevata percentuale di presenza di superfici

dure, in particolare asfatate, comporta un alto assorbimento dell'energia solare dovuto alla qualità di questo materiale caratterizzato da un alto albedo.

Per quanto riguarda la vegetazione verticale, è emerso come il numero sia particolarmente esiguo e quindi il potenziale miglioramento delle condizioni microclimatiche è limitato.

1. Figura 4.4.1.1. Assonometria completa dello stato di fatto del Politecnico, qualità degli spazi esterni.

2. Figura 4.4.1.2. Planimetria dello stato di fatto del Politecnico, vuoti.

SUPERFICIE IMPERMEABILE



66.420 m²

SUPERFICIE ASFALTATA



46.000 m²

SUPERFICIE ATTREZZATA PER ATTIVITÀ ESTERNE



20.250 m²

SUPERFICIE LAPIDEA O CEMENTATA



20.000 m²

SUPERFICIE ADIBITA A PARCHEGGIO A RASO



15.000 m²

SUPERFICIE VERDE PERMEABILE



14.580 m²

TOTALE SUPERFICI OUTDOOR



81.000 m²

Figura 4.4.1.1



0 50m

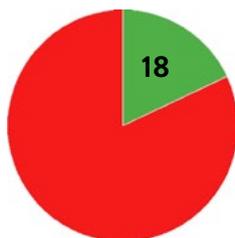


Figura 4.4.1.2



0 50m

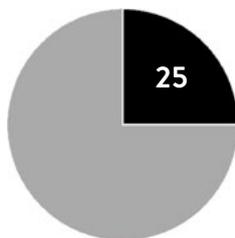




SUPERFICIE PERMEABILE

Il 18 per cento della superficie (14.580 m²) rimane permeabile mentre 66.420 m² sono impermeabili.

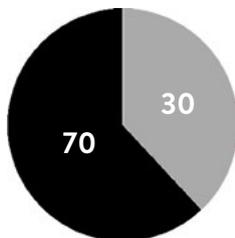
Figura 4.4.1.3. - Suddivisione superfici outdoor - permeabili/impermeabili



SPAZI ATTREZZATI

Il 25 per cento della superficie outdoor (20.250 m²) è attrezzato per attività ricreative e di studio

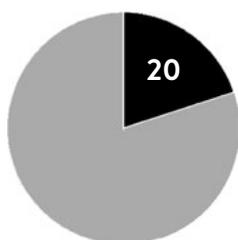
Figura 4.4.1.4. - Percentuale spazi outdoor attrezzati



SUPERFICI IMPERMEABILI

Quasi 20.000 m² su 66.420 sono pavimentazioni in materiale lapideo o cemento, mentre oltre 46.000 m² sono di asfalto.

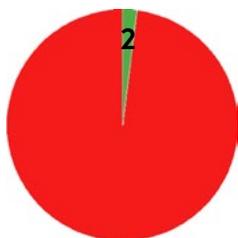
Figura 4.4.1.5. - Suddivisione superfici impermeabili



PARCHEGGI A RASO

Il 20 per cento delle superfici outdoor sono adibite a parcheggi, una superficie pari a 15.000 m² su 81.000 m²

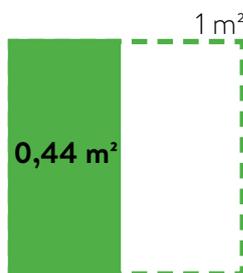
Figura 4.4.1.6. - Estensione superficie dedicata a parcheggio



TETTI VERDI

1.500 m² di tetto verde sopra le aule I della cittadella politecnica, corrispondente al 2 per cento del totale.

Figura 4.4.1.7. - Estensione tetti verdi



SPAZI VERDI PER STUDENTI

Ogni studente ha a disposizione circa 0,44 m² di spazi verdi a disposizione all'interno del campus universitario.

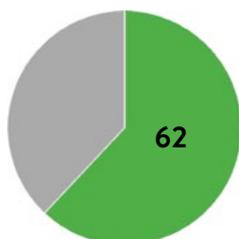
Figura 4.4.1.8. - Disponibilità spazi verdi per studente

4.5 ANALISI DELLA VEGETAZIONE

Il rilievo degli alberi presenti nel campus è stato condotto tramite sopralluogo nell'università e con il supporto delle immagini satellitari di GoogleMaps. Il numero trovato di alberi è quindi un'approssimazione ma si ritiene comunque un dato pressochè affidabile. Gli alberi presenti sono circa 110 sparsi tra tutti gli spazi verdi dell'università. Nella sede centrale, si trovano alberi ad alto fusto tra le corti della sede originale del 1958 e nelle ali del primo ampliamento degli anni Ottanta, che ombreggiano gli spazi nei periodi estivi. Nella parte della cittadella invece gli alberi hanno altezze più contenute e quindi anche gli effetti di mitigazione del clima sono minori. Il tetto verde delle aule I in particolare presenta prato e schermature solari realizzate in telaio metallico su cui stagionalmente cresce la pianta della vite, il resto degli spazi esterni permeabili sono ricoperti da prato e il ruolo di schermatura solare da parte delle piante è molto limitato.

La maggior parte degli alberi, il 62%, si trovano nella sede storica del Politecnico, compresa tra C.so Duca

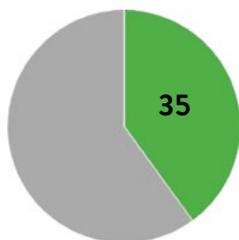
degli Abruzzi e C.so Castelfidardo. Poco più di un terzo degli alberi ha un'altezza compresa tra i 10 e 25 metri, il restante numero sono piccoli alberi a basso fusto. Tenendo in considerazione che il numero di studenti iscritti al Politecnico sia circa 33.000 studenti, si ha come rapporto 300:1.



DISTRIBUZIONE DELLA VEGETAZIONE

Il 62 per cento degli alberi sono piantati nella sede storica del Politecnico, quindi 68 su i 110 totali.

Figura 4.5.1. - Suddivisione della vegetazione tra Cittadella e sede centrale



ALTEZZA DEGLI ALBERI

44 alberi sono ad alto fusto con un'altezza compresa tra i 10 e 25 metri.

Figura 4.5.2. - Percentuali alberi sopra i 10 metri

RAPPORTO STUDENTI:ALBERI

300:1

Gli studenti iscritti al Politecnico sono 33.000 studenti si raggiunge il rapporto 300:1.

Figura 4.5.3. - Rapporto Studenti/alberi

1. Figura 4.5.4. Immagine delle aule e laboratori corte su C.so Castelfidardo della sede centrale.

2. Figura 4.5.5. Immagine del tetto verde delle aule I, Cittadella.

3. Figura 4.5.6. Parcheggio dietro le nuove aule R, Cittadella.

4. Figura 4.5.7. Cortile e aule del "muro di vetro", sede centrale.



Figura 4.5.4



Figura 4.5.5



Figura 4.5.6



Figura 4.5.7

4.6 MASTERPLAN DI ATENEIO - ANALISI DEL COSTRUITO

Gli interventi del Masterplan di Ateneio sono indirizzati ad una densificazione della sede universitaria, nel caso della sede centrale e della cittadella, il progetto prevede la costruzione di 4 nuovi edifici fuori terra. Il rapporto di copertura del lotto sarà così maggiore, ma allo stesso tempo è prevista la rimozione delle due piazze adibite a parcheggi a raso nella cittadella, spostando questi ultimi sottoterra e nel silo multipiano. I nuovi edifici, saranno tutti della parte della cittadella, è stata pensata una nuova stecca con un centro culturale e uffici su corso Castelfidardo appoggiata all'edificio del sovrappasso, due edifici saranno

costruiti nella zona in cui vi è il parcheggio di fronte le aule M e N ed ospiteranno i servizi di welfare per gli studenti, un edificio adiacente alle aule R che sarà sede delle aule R2 e infine due edifici bassi nella corte del sovrappasso per i servizi.

1. Figura 4.6.2. Assonometria completa del masterplan di progetto del Politecnico.

2. Figura 4.6.3. Planimetria del masterplan di progetto del Politecnico, vuoti.

3. Figura 4.6.4. Planimetria del masterplan di progetto del Politecnico, pieni.

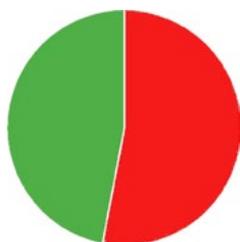


Figura 4.6.1 - Indice di copertura Masterplan di ateneio

Figura 4.6.2



0 50m



Figura 4.6.3



0 50m

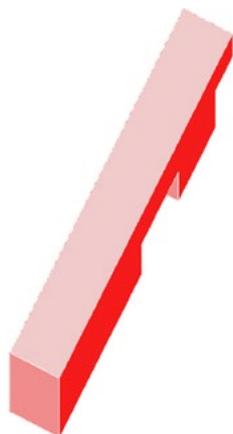


Figura 4.6.4



0 50m





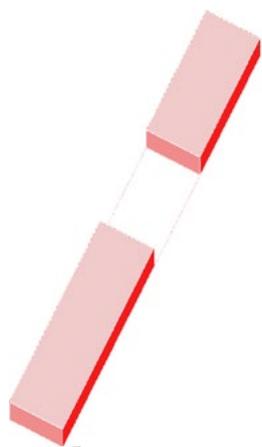
CENTRO CULTURALE

Nuova manica su C.so
Castelfidardo

Superficie coperta: **3.200 m²**

Piani fuori terra: **3**

Anno di costruzione: **2025-**



CASA DEL WELFARE

Nuovi edifici per attività sportive
e ricreative

Superficie coperta: **3.600 m²**

Piani fuori terra: **1**

Anno di costruzione: **2022-**

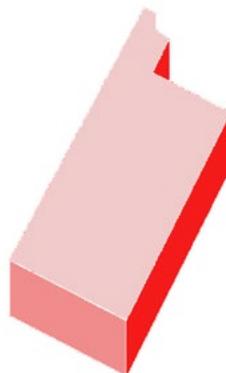
AULE R2

Nuove aule adiacenti alle R1

Superficie coperta: **2.000 m²**

Piani fuori terra: **2**

Anno di costruzione: **2025-**



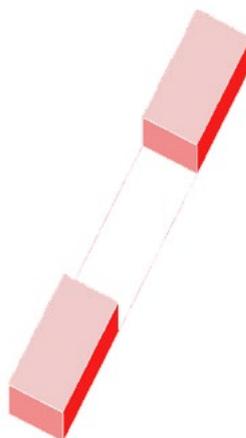
SERVIZI

Nuovi bassi volumi che ospitano servizi nella corte su C.so Castelfidardo

Superficie coperta: **1.000 m²**

Piani fuori terra: **1**

Anno di costruzione: **2025-**



4.6.1 ANALISI DEGLI SPAZI OUTDOOR E DELLA VEGETAZIONE

Gli interventi del Masterplan di Ateneo sono indirizzati ad una centralizzazione della sede universitaria, nel caso della sede centrale e della cittadella, il progetto prevede la costruzione di 4 nuovi edifici fuori terra. Il rapporto di copertura del lotto sarà così maggiore, ma allo stesso tempo è prevista la rimozione delle due piazze adibite a parcheggi a raso nella cittadella, spostando questi ultimi sottoterra e nel silo multipiano. I nuovi edifici, saranno tutti della parte della cittadella, è stata pensata una nuova stecca con un centro culturale e uffici su corso Castelfidardo appoggiata all'edificio del sovrappasso, due edifici saranno costruiti nella zona in cui vi è il parcheggio di fronte le aule M e N ed ospiteranno i servizi di welfare per gli studenti, un edificio adiacente alle aule R che sarà sede delle aule R2 e infine due edifici bassi nella corte del sovrappasso per i servizi.

SUPERFICIE IMPERMEABILE

38.000 m²

SUPERFICIE ASFALTATA

17.580 m²

SUPERFICIE ATTREZZATA PER ATTIVITÀ ESTERNE

23.250 m²

SUPERFICIE LAPIDEA O CEMENTATA

20.000 m²

SUPERFICIE ADIBITA A PARCHEGGIO A RASO

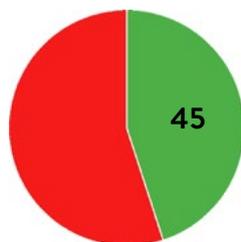
5.000 m²

SUPERFICIE VERDE PERMEABILE

33.000 m²

TOTALE SUPERFICI OUTDOOR

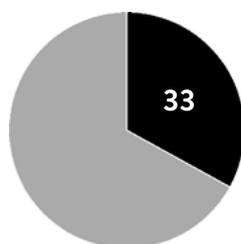
71.000 m²



SUPERFICIE PERMEABILE

Il 45 per cento della superficie (33.000 m²) rimane permeabile mentre 38.000 m² sono impermeabili.

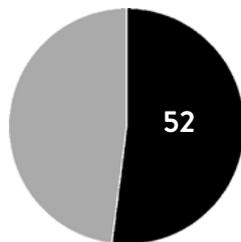
Figura 4.6.1.1 - Suddivisione superfici outdoor - permeabili/impermeabili



SPAZI ATTREZZATI

Il 33 per cento della superficie outdoor (23.250 m²) è attrezzato per attività ricreative e di studio

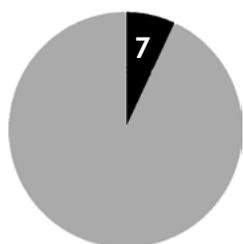
Figura 4.6.1.2 - Percentuale spazi outdoor attrezzati



SUPERFICI IMPERMEABILI

Quasi 20.000 m² su 38.000 sono pavimentazioni in materiale lapideo o cemento, mentre oltre 17.580 m² sono di asfalto.

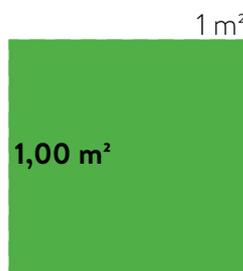
Figura 4.6.1.3 - Percentuale spazi outdoor attrezzati



PARCHEGGI A RASO

Il 7 per cento delle superfici outdoor sono adibite a parcheggi, una superficie pari a 5.000 m² su 71.000 m²

Figura 4.6.1.4 - Estensione superficie dedicata a parcheggio



SPAZI VERDI PER STUDENTI

Ogni studente ha a disposizione circa 1 m² di spazi verdi a disposizione all'interno del campus universitario.

Figura 4.6.1.5 - Disponibilità spazi verdi per studente

RAPPORTO STUDENTI:ALBERI

300:2,5

Gli studenti iscritti al Politecnico sono 33.000 studenti si raggiunge il rapporto 300:2,5.

Figura 4.6.1.6 - Rapporto Studenti/alberi

1. Figura 4.6.1.7 Immagine del parcheggio multipiano e i lavori della fossa del parcheggio interrato.

2. Figura 4.6.1.8 Immagine delle aule M e N e il cantiere del parcheggio interrato e la casa del Welfare.



Figura 4.6.1.7



Figura 4.6.1.8

4.7 STATO DI FATTO VS MASTERPLAN DI ATENEIO

SUPERFICIE COPERTA (IC)¹

SUPERFICI OUTDOOR

SUPERFICI IMPERMEABILI

SUPERFICI PERMEABILI

PARCHEGGI A RASO

VERDE PRO-CAPITE

SPAZI OUTDOOR ATTREZZATI

1. Indice di copertura.

STATO DI FATTO

MASTERPLAN

| | | |
|---------------------------------|-----------------------------|-------------|
| 69.000 m² 46% | 79.500 53 % | + 13 % ▲ |
| 81.000 m² | 71.000 m² | - 12 % ▼ |
| 66.420 m² | 38.000 m² | - 42 % ▼ |
| 14.580 m² | 33.000 m² | + 61 % ▲ |
| 15.000 m² | 5.000 m² | - 66 % ▼ |
| 0,44 m²/st | 1 m²/st | + 56 % ▲ |
| 20.000 m² | 23.250 m² | + 14 % ▲ |

4.8 LA FUTURA SEDE DEL POLITECNICO

Nel complesso gran parte degli interventi del Masterplan ruotano attorno alla cittadella politecnica, riservando alla parte storica, saturata dal punto di vista costruttivo, interventi minori relativi spesso alla sostituzione dei rivestimenti lapidei delle pavimentazioni e alla densificazione delle alberature.

Il completamento degli interventi del Masterplan contribuirebbe a migliorare in modo diffuso le condizioni di comfort termico degli spazi outdoor. Se nel complesso gli interventi previsti dai progetti portano ad un aumento dell'indice di copertura (Aumento del 13% delle superfici cementate) questo aumento non coincide con una diminuzione degli spazi permeabili ma, anzi, questi ultimi complessivamente subiscono un aumento. Infatti, le aree permeabili passano da circa 15.000 m² ad oltre 33.000 m². Il raddoppio delle superfici permeabili e dunque una considerevole diminuzione di quelle impermeabili (da 66.420 m² a 38.000 m² post interventi) è dovuto principalmente alla scelta di elimina-

re due piastre di parcheggi a raso nella parte del raddoppio. Queste due aree dedicate a parcheggio in superficie occupavano circa il 20% della superficie della cittadella politecnica. La scelta di interrare gran parte della quota di parcheggi a raso ha permesso di liberare molta superficie, la quale grazie i tetti verdi dei garage sottostanti è tornata permeabile e caratterizzata da prato. La superficie naturale caratterizzata da prato/alberatura comporta un deciso miglioramento delle condizioni microclimatiche. Le superfici ricoperte da asfalto (albedo 0,1), in grado di assorbire gran parte della radiazione solare porta ad elevate temperature superficiali a discapito del comfort degli occupanti, diventano superfici rivestite da prato, con un potere riflessivo maggiore.

Inoltre è anche importante l'aumento della quota di verde pro capite post intervento. Il confronto pre e post intervento può essere eseguito grazie al rilievo delle piante a medio/alto fusto e al numero di nuove

piantumazioni previsto nel progetto. La presenza di piante ad alto o medio fusto è essenziale per garantire ombreggiamento e naturale schermatura solare delle aree sottostanti, che guadagnano un miglioramento delle condizioni ambientali di contorno. Nello specifico si passa da un rapporto Studente/alberi 300:1 ad un rapporto più che doppio di 300:2.5. Per chiarire, questo rapporto è calcolato come numero totale di iscritti al Politecnico (dunque non solamente degli studenti che frequentano gli spazi della sede centrale e della cittadella) che al 2023 è circa 33.000 e il numero di alberi pre e post. La situazione post, rende sicuramente più verde e aumenterebbe la qualità e la quantità degli spazi aperti, aumentando allo stesso momento i volumi e gli spazi dedicati alla didattica e al welfare degli studenti e dei docenti.

Risultati aspettati dall'analisi climatica

Alla luce dell'analisi della situazione

complessiva del sito e al background scientifico acquisito fino a qui, ci si può aspettare dal confronto delle simulazione climatiche un potenziale miglioramento delle condizioni di comfort ambientale di quei spazi toccati dagli interventi del masterplan. Ci si aspetta in particolare un riscontro positivo nell'area dei due parcheggi vicino alle aule P oltre che nelle corti dell'ala storica dove vi è stata una piantumazione di alberi.

/05
SIMULAZIONI
E LETTURA DEI
RISULTATI

5.1 OUTPUT

Nelle pagine che seguono sono riportate le mappe di analisi estratte dal software ENVI-MET, che sono state calcolate nelle ore più significative: le 10.00, le 12.00 e in particolare 15.00. L'intervallo orario compreso dalle 14.00 e 16.00 del 25 luglio 2022 è emerso come il più caldo della giornata. Le mappe mostrano la temperatura potenziale dell'aria, la temperatura superficiale, la velocità del vento e l'indice di comfort PET. Questi parametri sono stati scelti perché influiscono maggiormente sul benessere termico e l'indice di comfort è il più comunemente usato nelle valutazioni all'aperto. Tutte le analisi sono state calcolate a + 2 m di altezza dal suolo, tranne la temperatura superficiale che è stata calcolata a livello 0. Per ogni ora e tipo di analisi c'è una scala di colore uniforme per tutti e quattro i lotti, che mostra le differenze di temperatura dell'aria e della superficie graficamente. Per rendere omogenee e confrontabili le mappe pre e post masterplan le legende degli output sono state armonizzate per fascia oraria. La scala di colore riporta i valori di temperatura

dell'aria, della temperatura superficiale, dei valori di P.E.T e velocità e direzione del vento con una scala di valori compresa tra il minimo e massimo valore raggiunto. Il valore massimo e minimo raggiunto è stato usato per suddividere il range in 10 unità e rendere direttamente confrontabili le legende, con la corrispondenza colore-valore identica, nelle stesse fasce orarie. Le mappe che seguono sono da leggere orizzontalmente, a sinistra si riportano gli estratti degli outputs della simulazione dello stato di fatto mentre a destra corrispondono gli outputs della simulazione del Masterplan, inseriti per le rispettive fasce orarie. Le mappe riportanti i dati rispettivi alle ore 15:00 sono più grandi, in quanto intervallo orario più critico e come già detto dove sono presenti i valori di picco.

5.2 TEMPERATURA DELL'ARIA

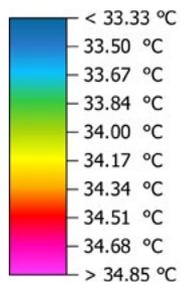
STATO DI FATTO

25/07/2022

Ore: 15:00

Z = 2 m

Potential Air Temperature



Min: 33.33 °C
Max: 35.02 °C

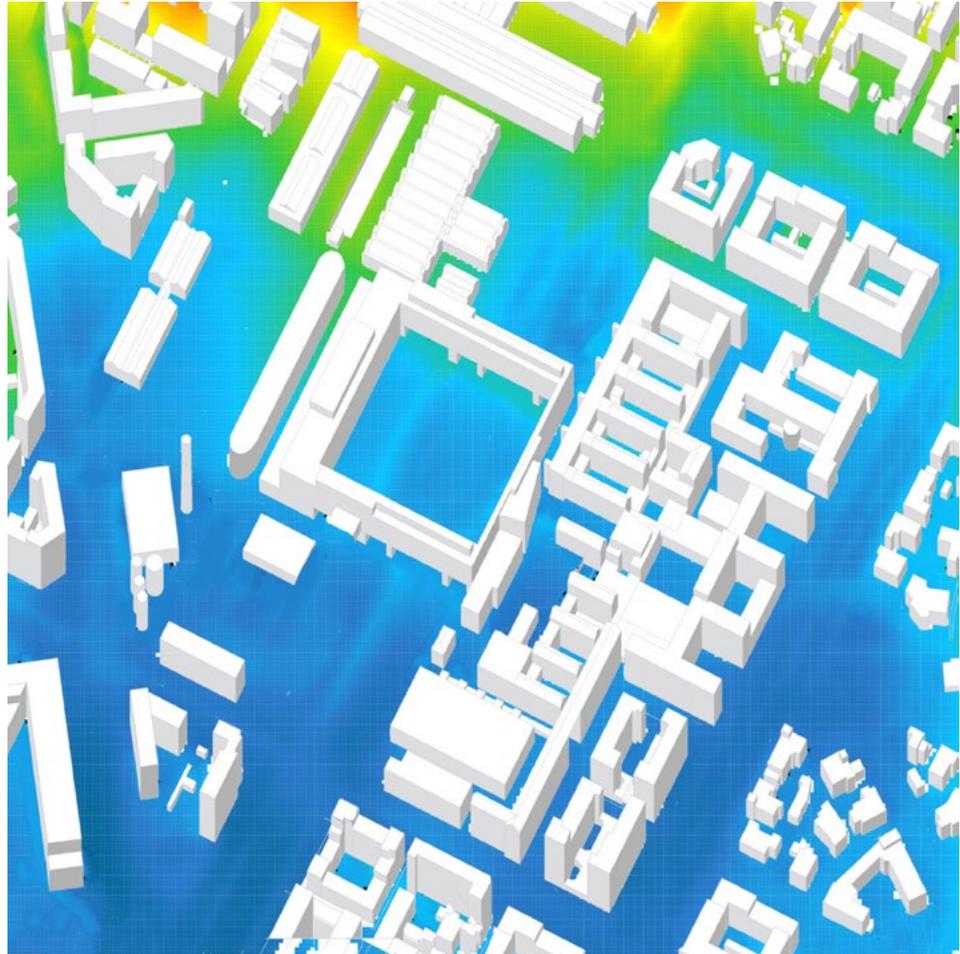


Figura 5.2.1 - Assonometria stato di fatto/temperatura dell'aria ore 15

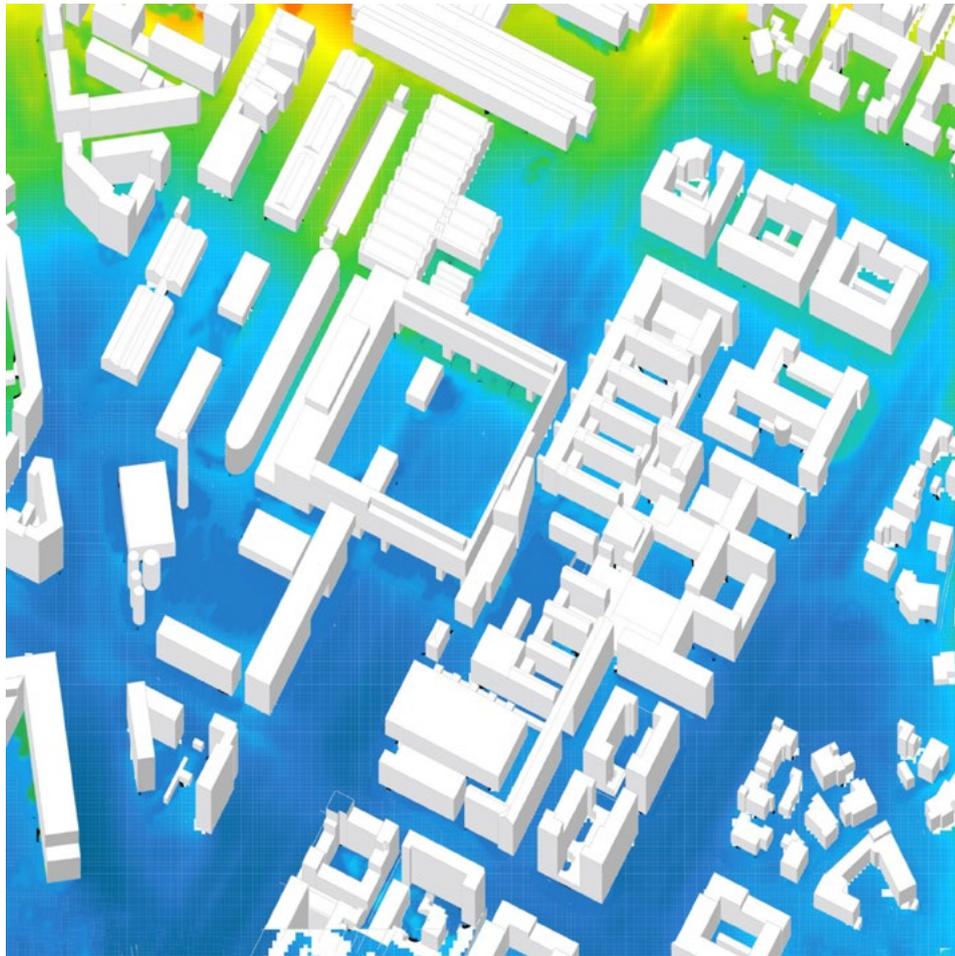


Figura 5.2.2 - Assonometria masterplan/temperatura dell'aria ore 15

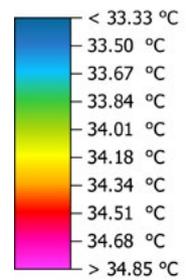
MASTERPLAN

25/07/2022

Ore: 15:00

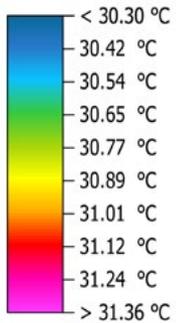
Z = 2 m

Potential Air Temperature

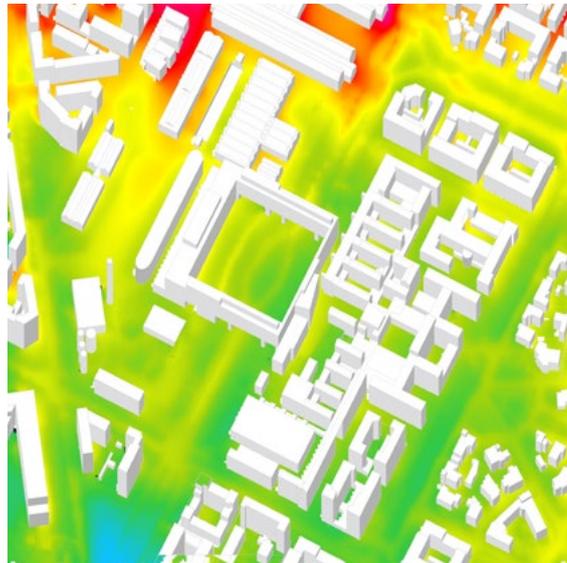


Min: 33.32 °C
Max: 35.01 °C

Potential Air Temperature



Min: 30.30 °C
Max: 31.47 °C



STATO DI FATTO

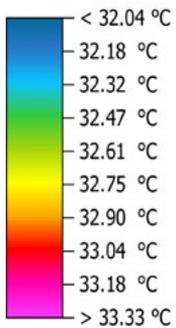
25/07/2022

Ore: 10:00

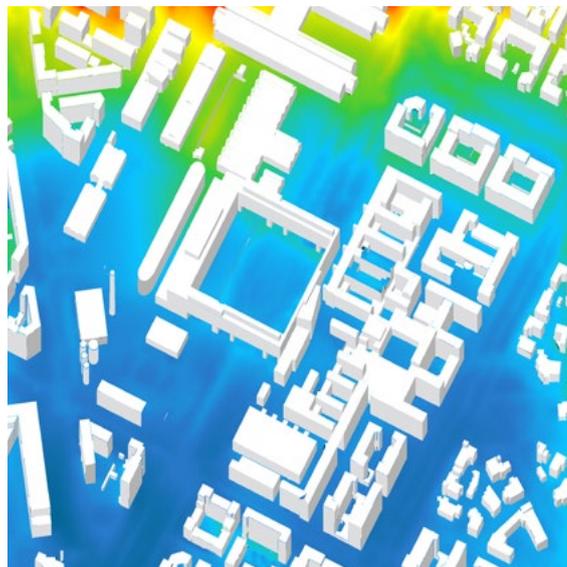
Z = 2 m

Figura 5.2.3 - Assonometria stato di fatto/temperatura dell'aria ore 10

Potential Air Temperature



Min: 32.04 °C
Max: 33.47 °C



STATO DI FATTO

25/07/2022

Ore: 12:00

Z = 2 m

Figura 5.2.4 - Assonometria stato di fatto/temperatura dell'aria ore 12

MASTERPLAN**25/07/2022**

Ore: 10:00

Z = 2 m

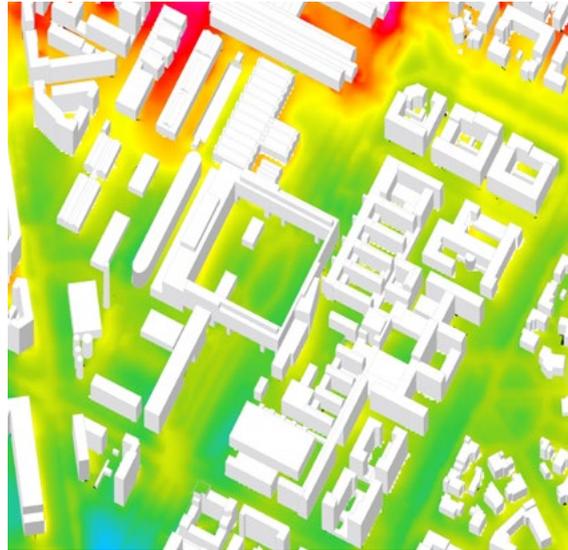
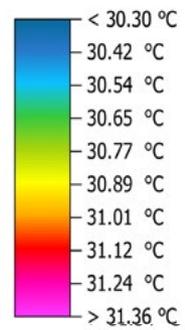
**Potential Air Temperature**Min: 30.28 °C
Max: 31.46 °C

Figura 5.2.5 - Assonometria masterplan/temperatura dell'aria ore 10

MASTERPLAN**25/07/2022**

Ore: 12:00

Z = 2 m

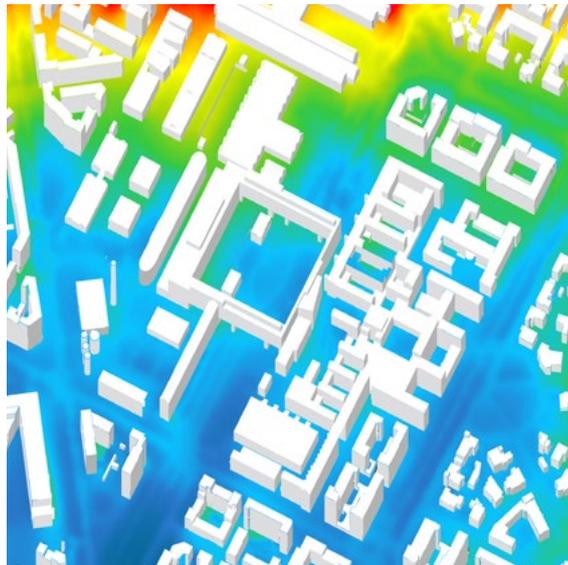
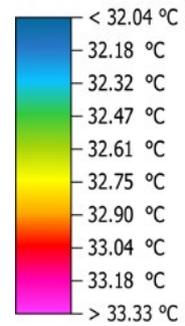
**Potential Air Temperature**Min: 32.02 °C
Max: 33.46 °C

Figura 5.2.6 - Assonometria masterplan/temperatura dell'aria ore 12

5.3 TEMPERATURA SUPERFICIALE

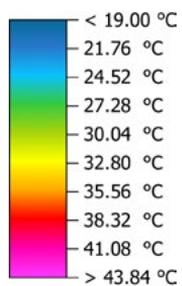
STATO DI FATTO

25/07/2022

Ore: 15:00

Z = 0 m

T Surface



Min: 19.00 °C
Max: 46.67 °C



Figura 5.3.1 - Assonometria stato di fatto/temperatura superficiale ore 15

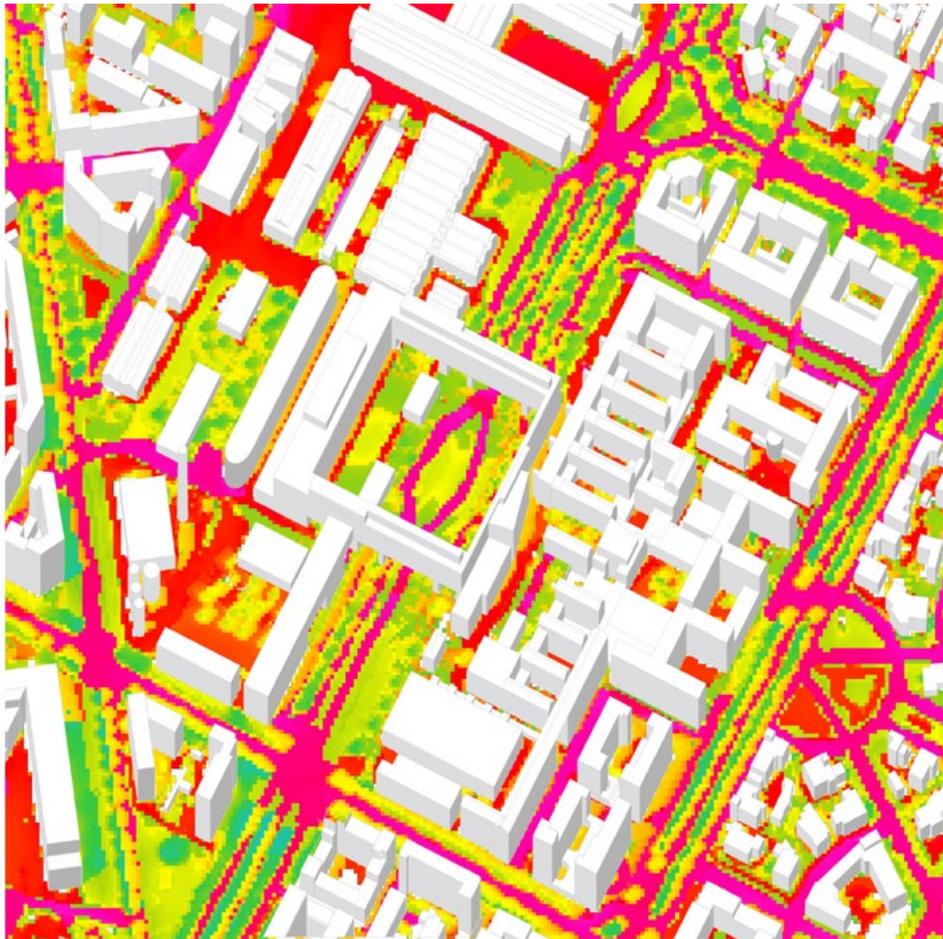


Figura 5.3.2 - Assonometria masterplan/temperatura superficiale ore 15

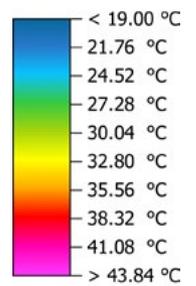
MASTERPLAN

25/07/2022

Ore: 15:00

Z = 0 m

T Surface



Min: 19.00 °C
Max: 46.60 °C

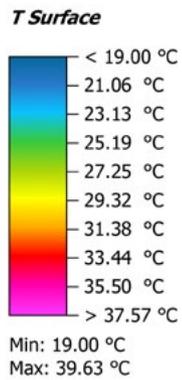


Figura 5.3.3 - Assonometria stato di fatto/temperatura superficiale ore 10

STATO DI FATTO

25/07/2022

Ore: 10:00

Z = 0 m

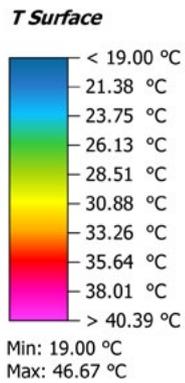


Figura 5.3.4 - Assonometria stato di fatto/temperatura superficiale ore 12

STATO DI FATTO

25/07/2022

Ore: 12:00

Z = 0 m

MASTERPLAN

25/07/2022

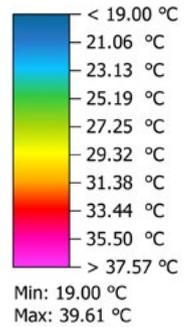
Ore: 10:00

Z = 0 m



Figura 5.3.5 - Assonometria masterplan/temperatura superficiale ore 10

T Surface



MASTERPLAN

25/07/2022

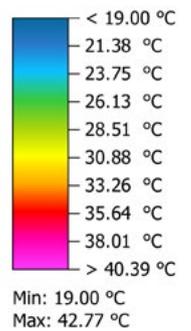
Ore: 12:00

Z = 0 m



Figura 5.3.6 - Assonometria masterplan/temperatura superficiale ore 12

T Surface



5.4 VELOCITÀ E DIREZIONE DEL VENTO

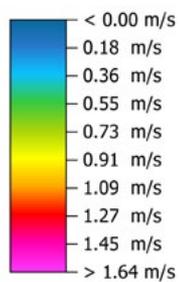
STATO DI FATTO

25/07/2022

Ore: 12:00

Z = 2 m

Wind Speed



Min: 0.00 m/s
Max: 1.82 m/s

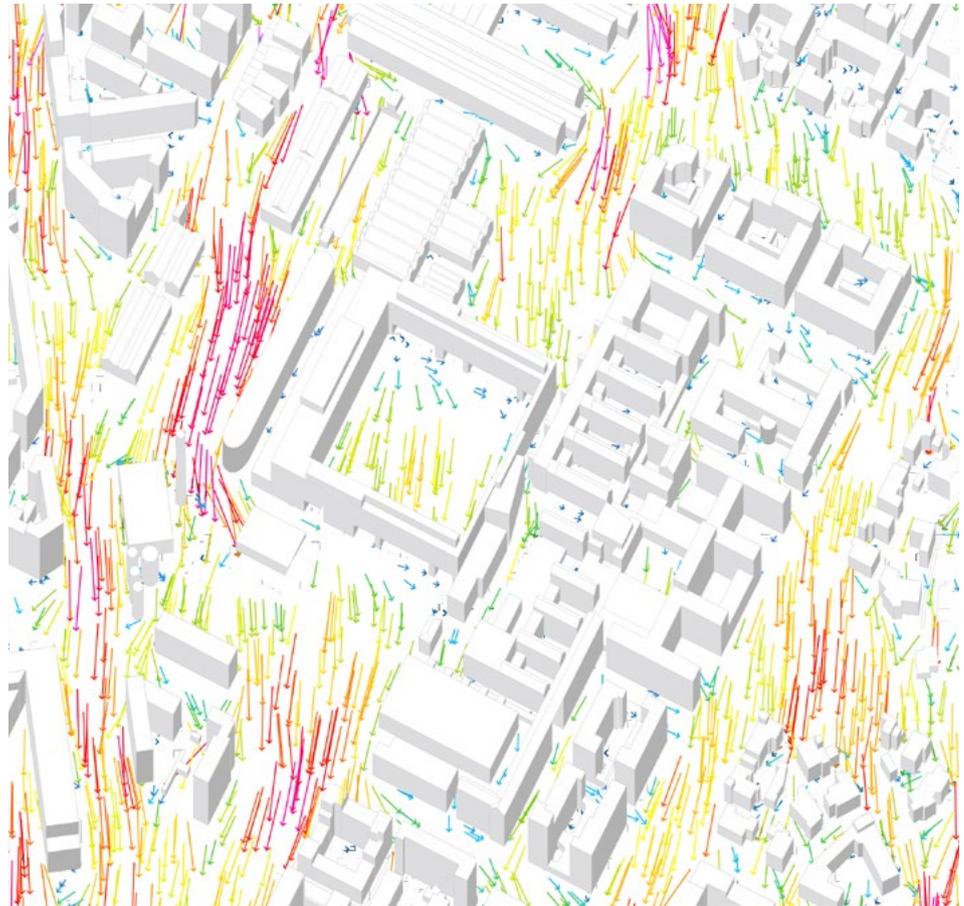


Figura 5.4.1 - Assonometria stato di fatto/direzione del vento ore 15

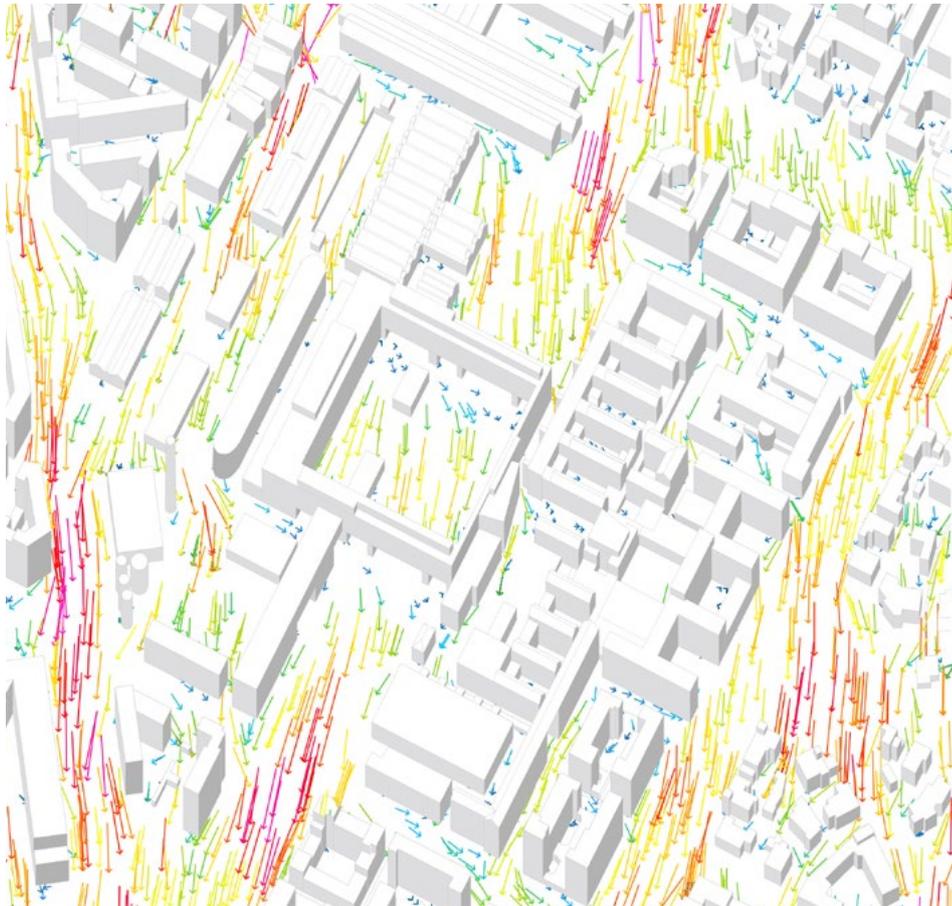
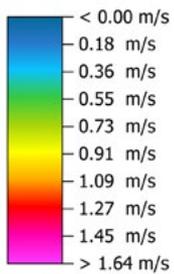


Figura 5.4.2 - Assonometria masterplan/direzione del vento ore 15

Wind Speed



Min: 0.00 m/s
Max: 1.82 m/s

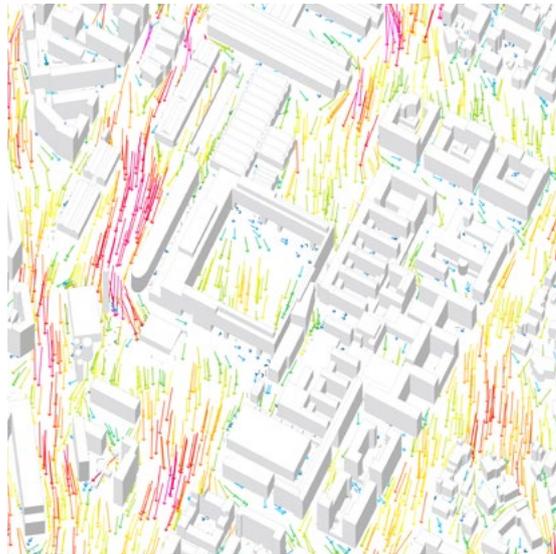


Figura 5.4.3 - Assonometria stato di fatto/direzione del vento ore 10

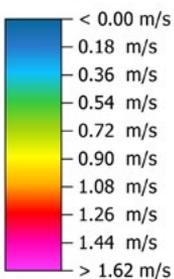
STATO DI FATTO

25/07/2022

Ore: 10:00

Z = 2 m

Wind Speed



Min: 0.00 m/s
Max: 1.80 m/s

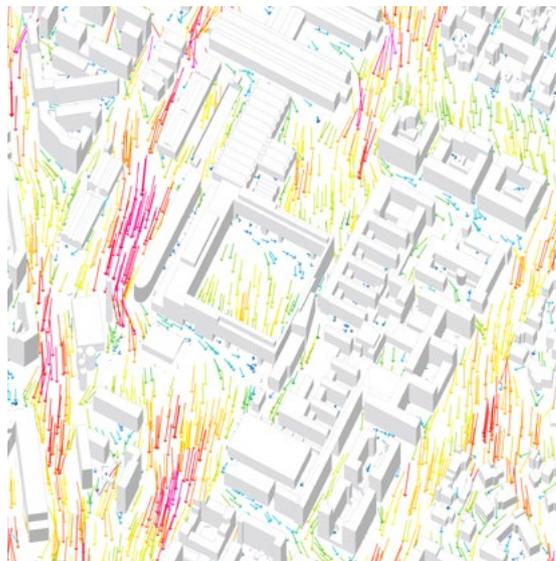


Figura 5.4.4 - Assonometria stato di fatto/direzione del vento ore 12

STATO DI FATTO

25/07/2022

Ore: 12:00

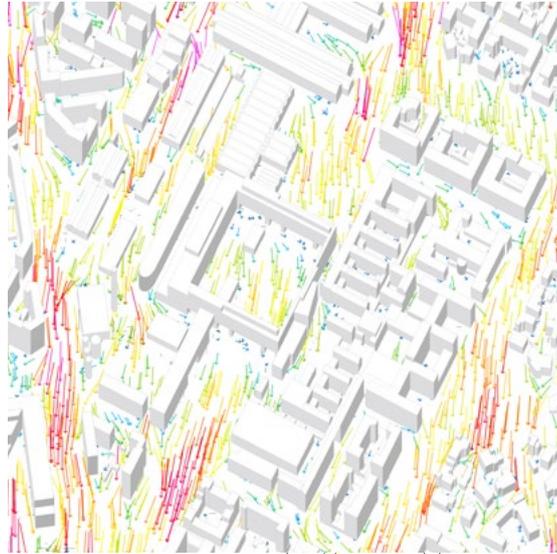
Z = 2 m

MASTERPLAN

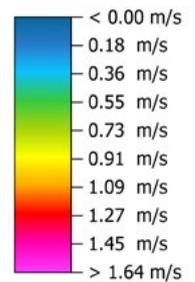
25/07/2022

Ore: 10:00

Z = 2 m



Wind Speed



Min: 0.00 m/s
Max: 1.76 m/s

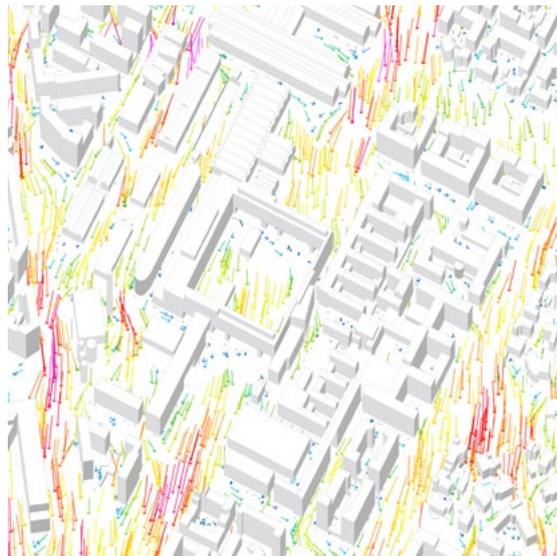
Figura 5.4.5 - Assonometria masterplan/direzione del vento ore 10

MASTERPLAN

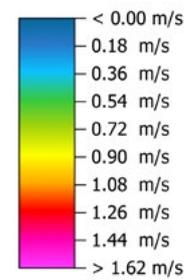
25/07/2022

Ore: 12:00

Z = 2 m



Wind Speed



Min: 0.00 m/s
Max: 1.74 m/s

Figura 5.4.6 - Assonometria masterplan/direzione del vento ore 12

5.5 PHYSIOLOGICAL EQUIVALENT TEMPERATURE

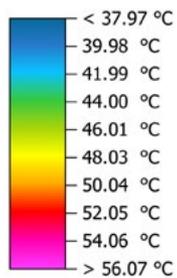
STATO DI FATTO

25/07/2022

Ore: 15:00

Z = 2 m

PET*



Min: 37.97 °C
Max: 58.09 °C

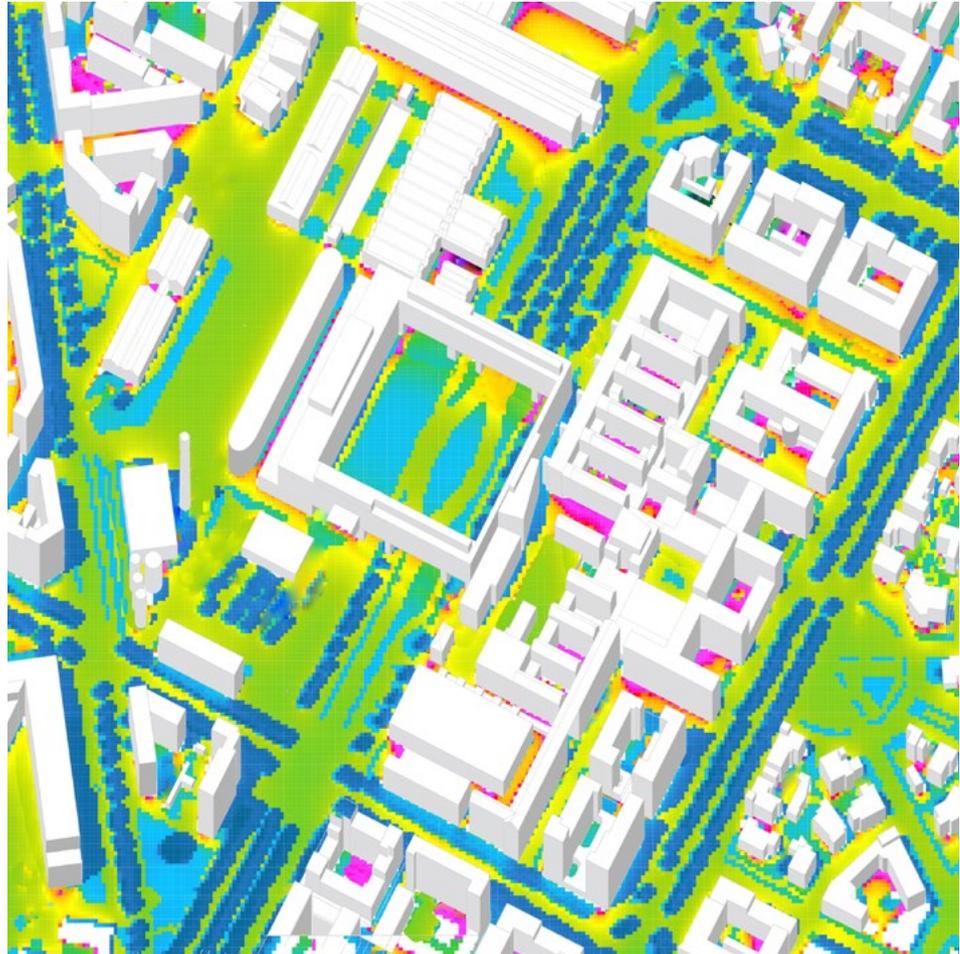


Figura 5.5.1 - Assonometria stato di fatto/PET ore 15

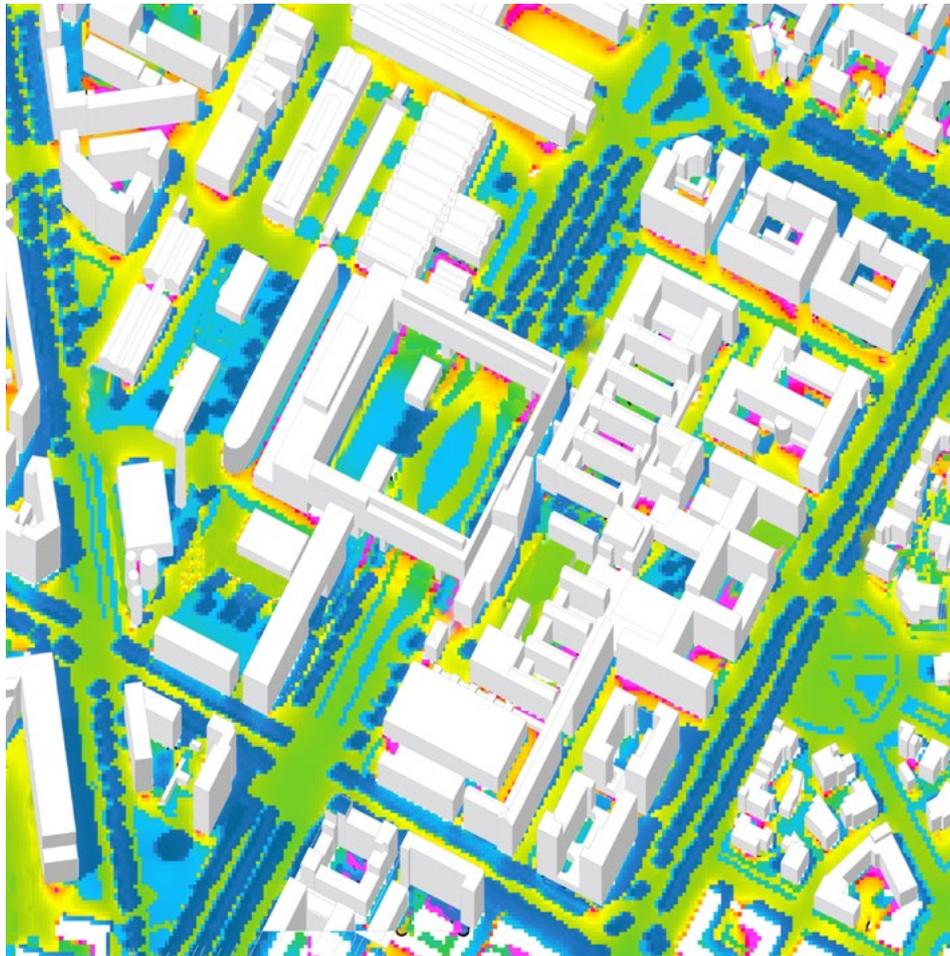


Figura 5.5.2 - Assonometria masterplan/PET ore 15

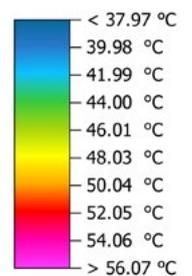
MASTERPLAN

25/07/2022

Ore: 15:00

Z = 2 m

PET*



Min: 37.88 °C
Max: 58.05 °C

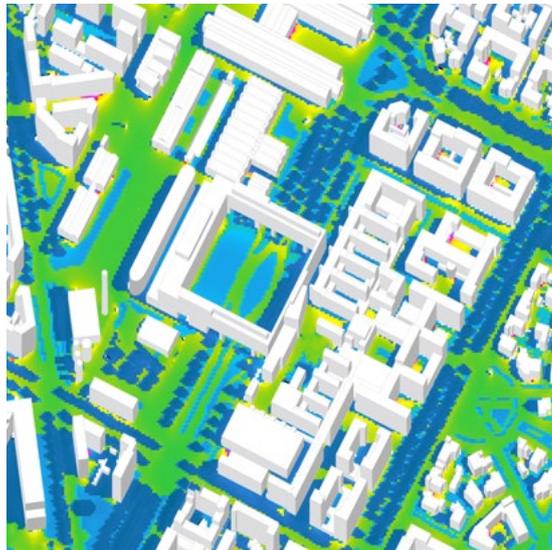
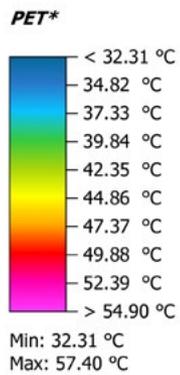


Figura 5.5.3 - Assonometria stato di fatto/PET ore 10

STATO DI FATTO

25/07/2022

Ore: 10:00

Z = 2 m

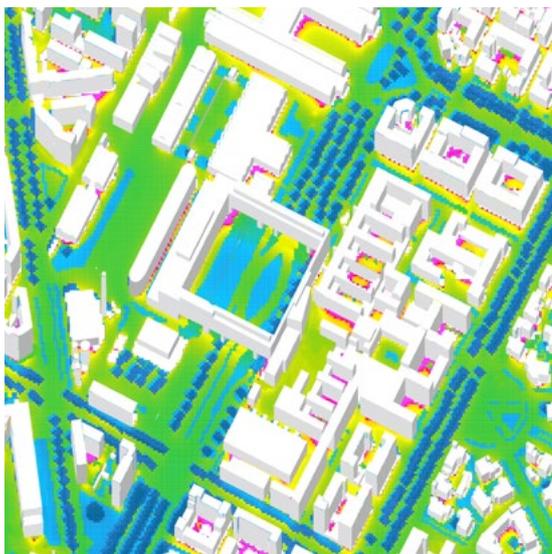
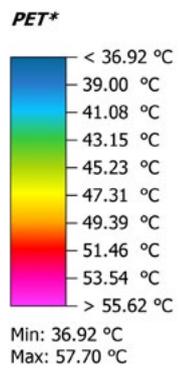


Figura 5.5.4 - Assonometria stato di fatto/PET ore 12

STATO DI FATTO

25/07/2022

Ore: 12:00

Z = 2 m

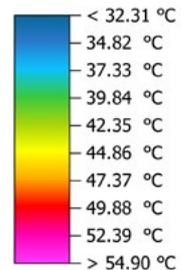
MASTERPLAN**25/07/2022**

Ore: 10:00

Z = 2 m



Figura 5.5.5 - Assonometria masterplan/PET ore 10

PET*Min: 34.27 °C
Max: 57.54 °C**MASTERPLAN****25/07/2022**

Ore: 12:00

Z = 2 m

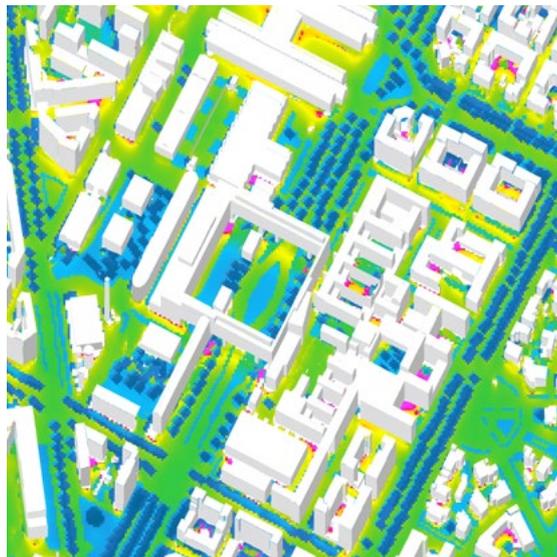
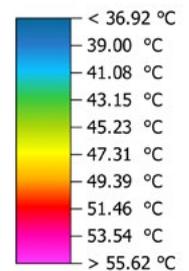


Figura 5.5.6 - Assonometria masterplan/PET ore 12

PET*Min: 36.82 °C
Max: 57.66 °C

5.6 DISPERSION PARTICOLATO ATMOSFERICO

PMcoarse Concentration

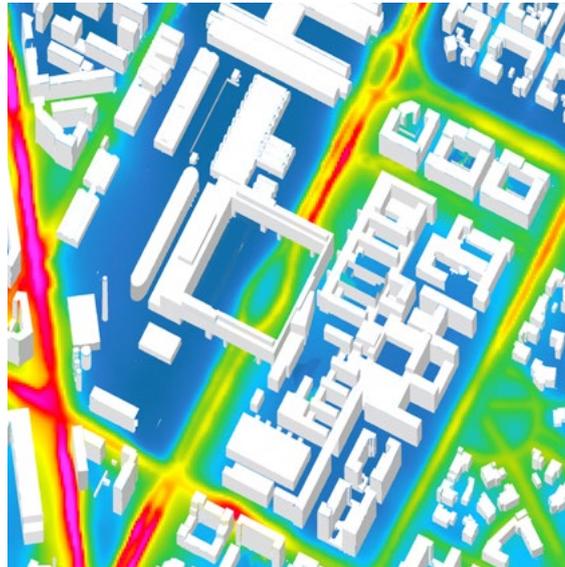
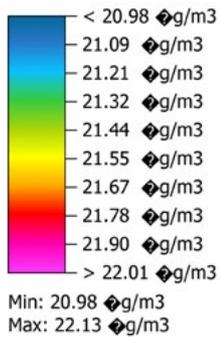


Figura 5.6.1 - Assonometria stato di fatto/particolato atmosferico ore 12

STATO DI FATTO

25/07/2022

Ore: 12:00

Z = 2 m

PMcoarse Concentration

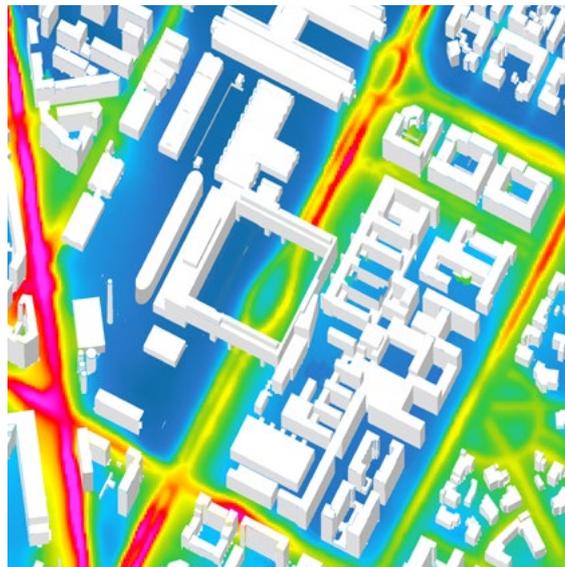
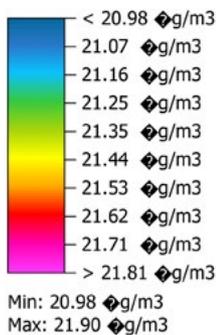


Figura 5.6.2 - Assonometria stato di fatto/particolato atmosferico ore 15

STATO DI FATTO

25/07/2022

Ore: 15:00

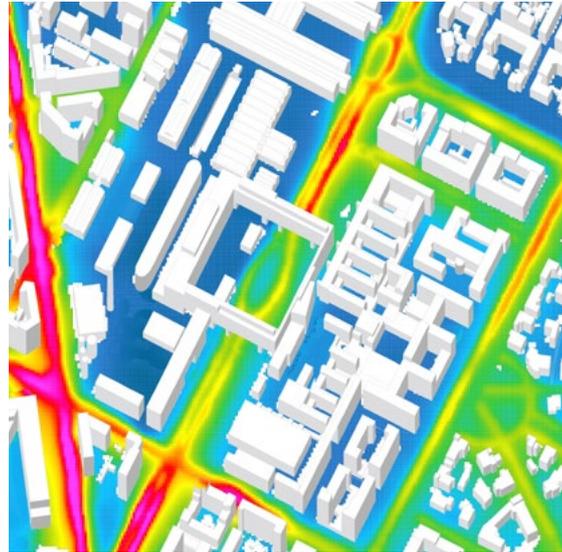
Z = 2 m

MASTERPLAN

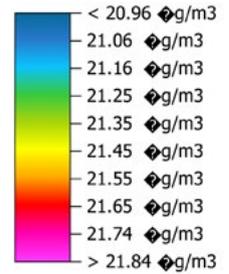
25/07/2022

Ore: 12:00

Z = 2 m



PMcoarse Concentration



Min: 20.96 g/m3
Max: 21.94 g/m3

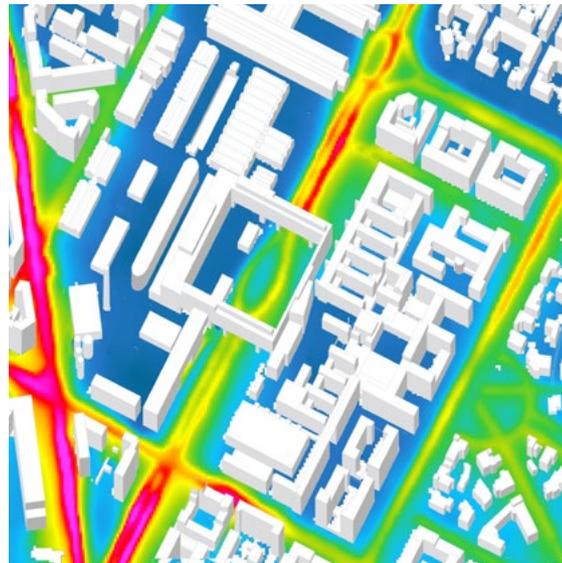
Figura 5.6.3 - Assonometria stato di fatto/particolato atmosferico ore 12

MASTERPLAN

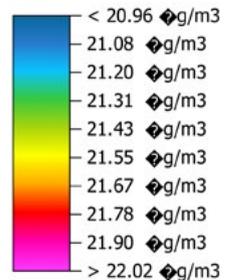
25/07/2022

Ore: 15:00

Z = 2 m



PMcoarse Concentrati



Min: 20.96 g/m3
Max: 22.13 g/m3

Figura 5.6.4 - Assonometria stato di fatto/particolato atmosferico ore 15

5.7 CONFRONTO DEI DELTA DI PET E T. SUPERFICIALE

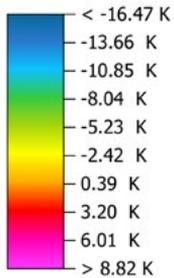
DIFFERENZA PET

25/07/2022

Ore: 15:00

Z = 2 m

*absolute difference PET**



Min: -16.47 K
Max: 11.63 K

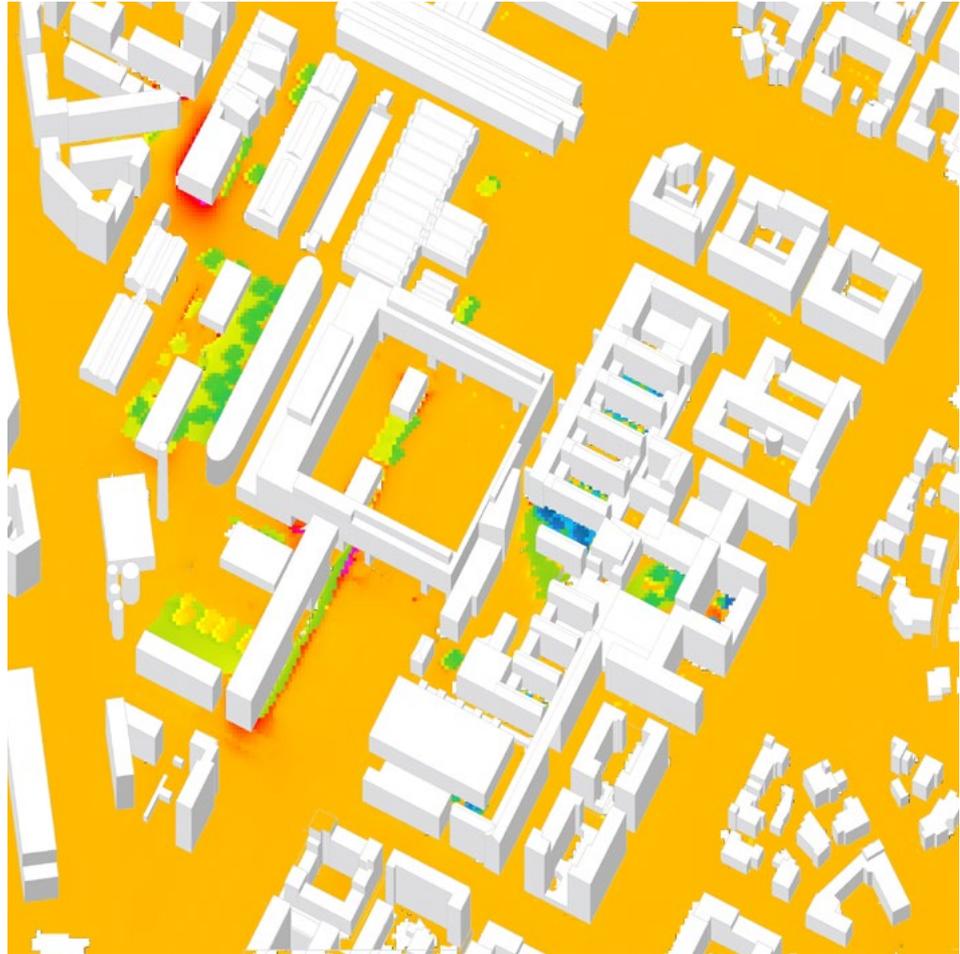


Figura 5.7.1 - Differenza assoluta dei valori di PET pre e post masterplan ore 15

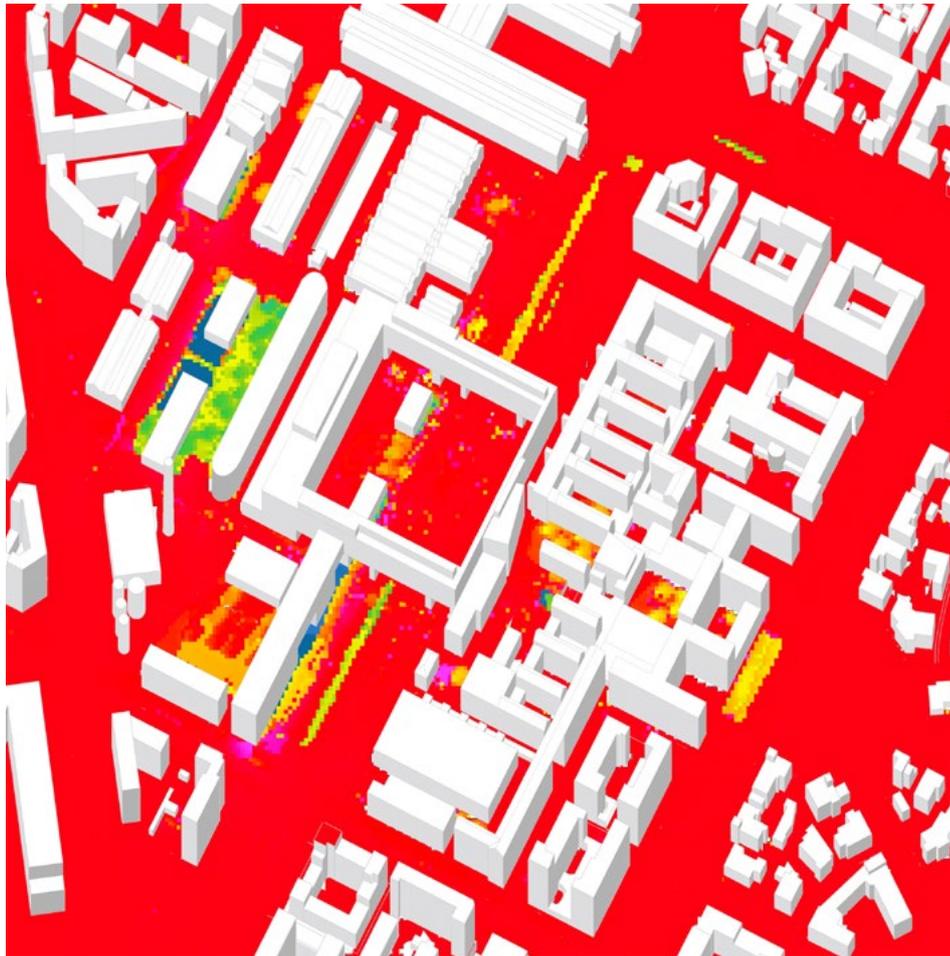


Figura 5.7.2 - Differenza assoluta dei valori di temperatura superficiale ore 15

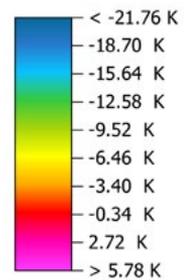
DIFFERENZA T. S.

25/07/2022

Ore: 15:00

Z = 0 m

absolute difference T Surface



Min: -21.76 K
Max: 8.84 K

5.8 ANALISI DEI DATI DI OUTPUT

Punti di controllo

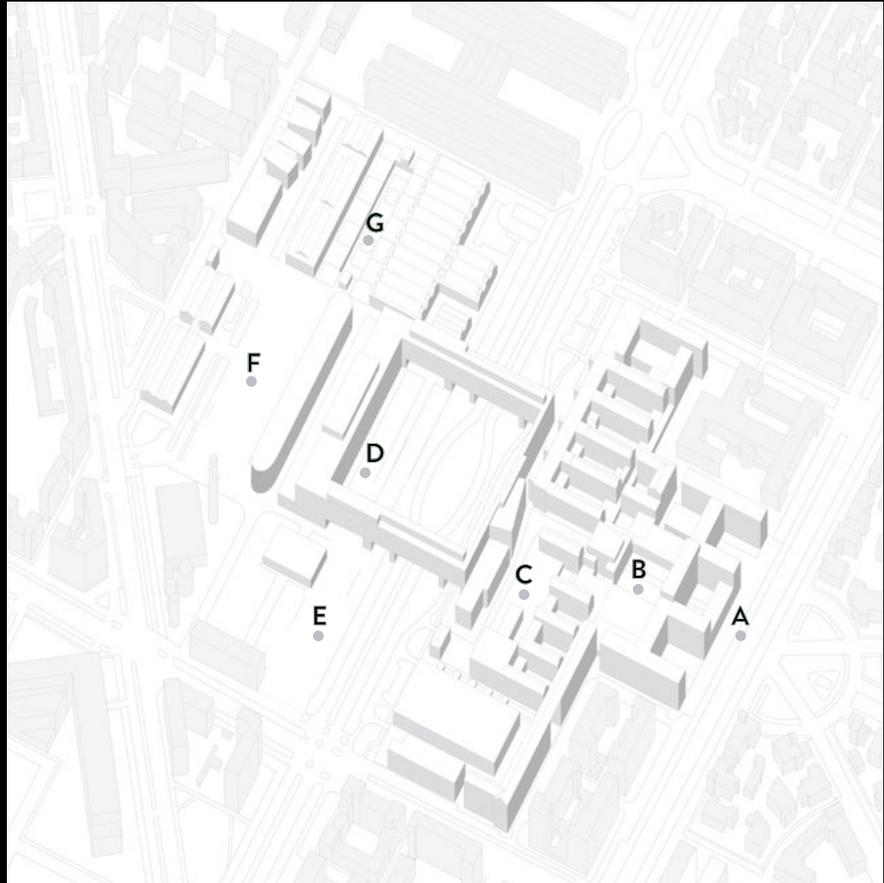


Figura 5.8.1. - Assonometria con punti di controllo

A ingresso principale C.so Duca
B corte auditorium Agnelli
C ingresso C.so Castelfidardo
D corte sovrappasso
E parcheggio aule P
F aule M e N
G corte aule I

Scelta dei punti di controllo

Sono stati individuati 7 punti strategici su cui condurre un confronto puntuale tra i risultati pre e post intervento. La scelta di questo tipo di confronto è dettata dalla possibilità di estrarre i valori puntuali degli indicatori di comfort (P.E.T.) e i dati climatici (temperatura dell'aria, temperatura delle superfici, direzione e velocità del vento) e quindi confrontare direttamente le stesse aree tra i due modelli. I punti individuati corrispondono a zone della sede centrale strategiche, caratterizzate da un grande passaggio di persone o zone di sosta sparsi in modo omogeneo sia nella parte storica che nella cittadella.

Il confronto

I due parametri scelti per il confronto delle condizioni di comfort outdoor sono l'indice di comfort termico P.E.T. e la temperatura superficiale e . Per ognuno dei quali si riporta il valore di ogni punto di controllo in entrambi i casi della simulazione. Si riporta poi l'eventuale scostamento

in percentuale ed evidenziato in verde in caso esso influisca positivamente sulla percezione del comfort degli occupanti.

Particolato atmosferico

Per l'analisi delle concentrazioni di particolato atmosferico viene usato un approccio diverso, nonostante influisca sul comfort delle persone all'esterno, in questo caso essendo il calcolo delle concentrazioni puramente sperimentale non viene fatto un confronto diretto ma bensì vengono riportati solamente i valori rispettivi di PM_{10} e $PM_{2,5}$ a titolo di completezza della ricerca e in quanto per un confronto affidabile sarebbe necessario considerare molti fattori emittivi difficili da quantificare ed individuare.

/05

TEMPERATURA SUPERFICIALE

INGRESSO PRINCIPALE C.SO DUCA

CORTILE AUDITORIUM AGNELLI

INGRESSO C.SO CASTELFIDARDO

CORTE SOVRAPPASSO

PARCHEGGIO AULE P

CORTILE AULE M & N

CORTE INTERRATA AULE I

STATO DI FATTO

MASTERPLAN

38.37 °C**33.19 °C****- 13.5 %**
▼**49.41 °C****41.16 °C****- 14.2 %**
▼**35.67 °C****35.16 °C****=****33.72 °C****33.29 °C****=****46.78 °C****37.95 °C****- 13.1 %**
▼**45.09 °C****41.59 °C****- 24.2 %**
▼**44.14 °C****44.04 °C****=**

/05

PHYSIOLOGICAL EQUIVALENT TEMPERATURE

INGRESSO PRINCIPALE C.SO DUCA

CORTILE AUDITORIUM AGNELLI

INGRESSO C.SO CASTELFIDARDO

CORTE SOVRAPPASSO

PARCHEGGIO AULE P

CORTILE AULE M & N

CORTE INTERRATA AULE I

STATO DI FATTO

MASTERPLAN

| | | |
|-----------------|-----------------|---------------|
| 47.57 °C | 45.05 °C | - 5.3 % ▼ |
| 41.27 °C | 35.42 °C | - 14.2 % ▼ |
| 44.98 °C | 45.16 °C | = |
| 43.91 °C | 39.29 °C | - 10.5 % ▼ |
| 44.78 °C | 38.95 °C | - 13.0 % ▼ |
| 43.91 °C | 33.29 °C | - 24.2 % ▼ |
| 41.14 °C | 41.29 °C | = |

PARTICOLATO ATMOSFERICO

Premessa

Questa parte della ricerca è puramente un'analisi sperimentale ed esplorativa della qualità dell'aria, in particolare della concentrazione di $PM_{2,5}$ e PM_{10} attorno al campus universitario. Nello specifico non si intende fare confronto tra i dati di output pre e post masterplan di Ateneo, in quanto sarebbero necessari interventi strutturali ampi e azioni sul traffico.

I risultati

Il particolato atmosferico derivato dai veicoli è costituito da particelle di dimensioni variabili (diametro inferiore ai 10 micron) che vengono emesse dai motori a combustione interna durante il processo di combustione del carburante. Queste particelle possono essere costituite da materiali diversi, tra cui carbonio, composti organici volatili e metalli. L'analisi da noi condotta, con i dati del rilevamento e i valori di background forniti da Arpa Piemonte non ha riscontrato pressochè nessuna distinzione tra i due casi simulati ovvero stato di fatto e masterplan. L'assenza di divergenze evidenti è sicuramente dovuta al fatto che gli

interventi previsti dal masterplan di progetto non prevedono grossi interventi su la circolazione viaria dei mezzi di trasporto a motore ad eccezione del tratto di strada antistante l'ingresso principale su C.so Duca resa dall'estate 2022 a traffico limitato con un basso scorrimento. **L'OMS fissa riferimento al PM_{10} il valore guida annuale di $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ da non superare.** I valori medi calcolati dal software sono risultati sempre superiori (WHO.int, 2023).

I punti più critici

Consultando i dati, è emerso particolarmente critica, con alte percentuali di particolato, alcune strade ad alta percorrenza. **C.so Ferrucci e l'incrocio tra C.so Peschiera e C.so Mediterraneo** hanno i valori più alti di concentrazione di inquinanti (figura 5.6.1) dove i valori di PM_{10} hanno raggiunto il **picco di $22,13 \text{ g}/\text{m}^3$.** Altre aree in cui sono emerse concentrazioni alte sono, altri corsi molto trafficati come, C.so Duca degli abruzzesi e C.so Castelfidardo (figura 5.6.1). Bisogna considerare che i dati sulla dispersione del particolato atmosferico

rico risentono molto delle condizioni climatiche. La velocità e la direzione del vento, influenzano sicuramente la concentrazione di valori maggiori in un'area piuttosto che un'altra, così come le precipitazioni o ostruzioni fisiche come gli edifici che bloccano la dispersione. È comunque "normale" accettare che nelle prossimità delle strade veicolari siano riscontrate le concentrazioni più alte e ciò indipendentemente dalle condizioni ambientali e meteorologiche.

Possibili soluzioni per limitare la diffusione del particolato

L'architettura può svolgere un ruolo cruciale nel mitigare la diffusione del particolato negli ambienti urbani. Ecco alcune soluzioni architettoniche che possono aiutare a ridurre l'impatto del particolato:

Infrastrutture verdi: incorporare spazi verdi, come giardini verticali, tetti verdi e parchi urbani, nel tessuto urbano. La vegetazione aiuta a catturare e filtrare il particolato, migliorando la qualità dell'aria e creando ambienti urbani più sani.

Planimetrie urbane e Stre-

et Design: Progettare planimetrie urbane che facilitino la corretta circolazione dell'aria e la dispersione degli inquinanti. Progettare strade con ampi marciapiedi, fasce verdi e vegetazione può aiutare a creare corridoi d'aria che promuovono la diluizione e la dispersione del particolato.

Traffico leggero: la promozione di città a misura di pedoni e ciclabili può ridurre le emissioni dei veicoli e il corrispondente particolato. La progettazione di zone pedonali e piste ciclabili dedicate può incoraggiare il trasporto non motorizzato, riducendo così i livelli di inquinamento.

Barriere contro l'inquinamento: erigere barriere fisiche come muri verdi, barriere antirumore o strutture appositamente progettate può aiutare a prevenire la diffusione di particolato da aree fortemente inquinate ai quartieri circostanti. Queste barriere possono essere combinate con sistemi di filtrazione o impianti per migliorare ulteriormente la loro efficacia.

INGRESSO PRINCIPALE C.SO DUCA

CORTILE AUDITORIUM AGNELLI

INGRESSO C.SO CASTELFIDARDO

CORTE SOVRAPPASSO

PARCHEGGIO AULE P

CORTILE AULE M & N

CORTE INTERRATA AULE I

| $PM_{2.5}$ | PM_{10} |
|--------------------------------|--------------------------------|
| 10.56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 21.07 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
| 11.05 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 20.98 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
| 10.80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 21.40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
| 12.21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 21.25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
| 12.06 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 21.16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
| 12.00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 21.21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
| 10.37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 20.51 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |

5.9 CRITICITÀ DELLE SINGOLE VARIABILI

La **Physiological Equivalent Temperature** è una misura che cerca di combinare la temperatura dell'aria, l'umidità, la velocità del vento e la radiazione solare per valutare il "disagio termico" sperimentato dal corpo umano. Tuttavia, come per qualsiasi misura, ci sono alcune limitazioni operative da considerare:

Variazioni individuali: la sensazione di disagio termico varia da persona a persona in base a diversi fattori, come l'età, il sesso, la salute e la condizione fisica. I valori usati in questa simulazione sono tarati infatti su una persona di sesso maschile adulta.

Ambiente specifico: la PET può dare una valutazione generale del disagio termico, ma può non tener conto di variabili specifiche dell'ambiente come l'esposizione al sole o la presenza di ombra o vento.

Condizioni ambientali estreme: la PET potrebbe non essere precisa in condizioni ambientali estreme, come quando la temperatura supera i 40°C o è inferiore a -5°C.

Limiti dei modelli: i modelli ma-

tematici che vengono utilizzati per calcolare la PET si basano su alcune semplificazioni e ipotesi, che possono limitare la loro accuratezza in determinate situazioni.

Limitazioni nella valutazione di aree molto grandi: la PET è stata progettata per valutare il disagio termico in aree relativamente piccole, come edifici o parchi urbani, ma potrebbe non essere adatta per la valutazione di aree molto grandi, come le campagne o le foreste.

In sintesi, la PET è uno strumento utile per valutare il disagio termico generale sperimentato dal corpo umano in diverse condizioni ambientali, ma ci sono alcune limitazioni operative da considerare., ma è tuttavia possibile farlo tra chiusure verticali ed orizzontali.

La **Temperatura superficiale** è un parametro importante nelle simulazioni microclimatiche, ma ci sono alcuni limiti operativi da considerare:

Variazioni spaziali: la temperatura superficiale può variare significativamente da un punto all'altro di

una superficie, a seconda delle condizioni ambientali e delle proprietà termiche del materiale. Pertanto, la scelta del punto di misura può influenzare significativamente i risultati delle simulazioni.

Dipendenza dalle condizioni ambientali: la temperatura superficiale è strettamente legata alle condizioni ambientali, come la temperatura dell'aria, l'umidità, la velocità del vento e la radiazione solare, che possono variare significativamente durante la giornata e da un luogo all'altro.

Dipendenza dalle proprietà termiche del materiale: la temperatura superficiale dipende anche dalle proprietà termiche del materiale che costituisce la superficie, come la conducibilità termica, la capacità termica e la riflettanza. Pertanto, la scelta del materiale può influenzare significativamente i risultati delle simulazioni.

Limitazioni nella valutazione delle condizioni di confort: la temperatura superficiale può fornire informazioni sulla temperatura effettiva della superficie, ma non tiene conto di altri fattori che influenzano

la sensazione di confort, come l'umidità, la velocità del vento e la radiazione solare.

Limitazioni nella valutazione degli impatti a lungo termine: la temperatura superficiale può fornire informazioni sulla temperatura effettiva della superficie in un dato momento, ma potrebbe non essere adatta per la valutazione degli impatti a lungo termine dell'esposizione prolungata alle temperature estreme, come l'insorgenza di malattie croniche o l'aumento del rischio di mortalità.

In sintesi, la temperatura superficiale è un parametro importante nelle simulazioni microclimatiche, ma ci sono alcuni limiti operativi da considerare. La sua interpretazione richiede un'analisi attenta e integrata con altre informazioni e dati relativi alle condizioni ambientali, alle proprietà termiche del materiale e alla sensazione di confort.

La concentrazione del **particolato atmosferico** è un parametro importante nelle simulazioni microclimatiche, ma ci sono alcuni limiti operativi da considerare:

Variazioni spaziali: la concentrazione del particolato atmosferico può variare significativamente da un punto all'altro di un'area, a seconda delle condizioni ambientali, della posizione e della sorgente delle emissioni. Pertanto, la scelta del punto di misura può influenzare significativamente i risultati delle simulazioni.

Dipendenza dalle condizioni ambientali: la concentrazione del particolato atmosferico è strettamente legata alle condizioni ambientali, come la temperatura dell'aria, l'umidità, la velocità del vento e la presenza di altre fonti di inquinamento. Pertanto, le variazioni di queste condizioni possono influenzare significativamente i risultati delle simulazioni.

Dipendenza dalle sorgenti emissive: la concentrazione del particolato atmosferico dipende anche dalle sorgenti di emissioni presenti nell'area di interesse, come il traffico veicolare, le attività industriali o le fonti naturali. Pertanto, la scelta e la quantificazione delle sorgenti di emissioni possono influenzare significativamente i risultati delle simu-

lazioni.

Limitazioni nella valutazione degli impatti sulla salute:

la concentrazione del particolato atmosferico può fornire informazioni sulla quantità di particolato presente nell'aria, ma non tiene conto delle proprietà chimiche e biologiche del particolato che possono influenzare gli impatti sulla salute umana.

In sintesi, la concentrazione del particolato atmosferico è un parametro importante nelle simulazioni microclimatiche, ma ci sono alcuni limiti operativi da considerare. La sua interpretazione richiede un'analisi attenta e integrata con altre informazioni e dati relativi alle condizioni ambientali, alle sorgenti di emissioni, alle proprietà chimiche e biologiche del particolato e agli impatti sulla salute umana.

5.10 CONSIDERAZIONI

Come anticipato sono stati scelti sette punti di controllo sparsi omogeneamente in luoghi nevralgici del Politecnico, compresi tra la parte originale e il raddoppio, con l'obiettivo di confrontare gli eventuali scostamenti nei risultati delle simulazioni climatiche tra lo stato di fatto e il masterplan di progetto. Si poteva ipotizzare un miglioramento generale delle condizioni di comfort a progetto di masterplan concluso e questo perchè nonostante sia previsto un aumento di volumetria abbastanza importante aumentano allo stesso tempo le superfici permeabili (i parcheggi a raso con alto albedo vengono sostituiti da zone permeabili principalmente verdi). Analizzando i dati estratti da Envi-met con il software di lettura Leonardo, le nostre ipotesi sono state confermate. Per due variabili importanti comfort termico si è riscontrato un miglioramento. La PET e la temperatura superficiale sono migliorate ovunque vi sia stato un intervento previsto dal masterplan di progetto e sono rimaste costanti in altri punti di controllo non toccati dal progetto.

PET

La physiological equivalent temperature è l'indice termico che tiene conto delle condizioni ambientali come temperatura, umidità e velocità del vento, ma anche del metabolismo umano e della vestizione per calcolare la percezione di calore del corpo umano ed è quindi la temperatura effettivamente percepita dal corpo umano in un dato ambiente, in base alle sue caratteristiche fisiologiche e alle condizioni ambientali.

Questo la rende ideale per comprendere il livello di comfort degli spazi outdoor dell'università e il livello di stress degli occupanti. La scala di stress della PET (vedi 3.3) indica i vari intervalli di stress a cui è sottoposto l'uomo.

Nei punti di controllo analizzati, come già accennato vi è un discreto miglioramento delle condizioni di comfort. Allo stato attuale di ottenimento, alle ore 15:00, sempre valori di PET di molto superiori a 41 °C. Superati i 41 °C l'uomo percepisce una sensazione termica molto calda e un **livello di stress fisiologico estremo**. Gli interventi del

masterplan aiutano ad abbassare questi valori di PET raggiungendo l'intervallo di stress inferiore in cui si ha una percezione termica calda e **un livello di stress fisiologico forte.**

Si può affermare che vi è un'effettiva riduzione dello stress termico, in quanto si passa da un livello estremo ad uno forte, questo però non coincide con una condizione ideale di comfort e il disagio dell'occupante è ancora importante.

Temperatura superficiale

La temperatura superficiale degli oggetti circostanti, come pareti, pavimenti, soffitti, mobili e attrezzature, può influire sulla sensazione di comfort termico di una persona. La temperatura superficiale troppo elevata può influire negativamente sulla sensazione di comfort termico. La temperatura superficiale degli oggetti circostanti troppo alta, a causa dell'esposizione alla luce solare diretta o all'uso di attrezzature che emettono calore, rende difficile mantenere una sensazione di freschezza.

Nel nostro caso, alle ore 15:00 ci sono superfici che raggiungono i 50 °C e più della metà supera i 40 °C. La conseguenza di essere esposti a queste temperature superficiali è, di nuovo, un forte disagio casuato dall'esposizione delle alte temperature radianti che colpiscono la superficie del corpo umano. I punti di controllo usati per il solito confronto hanno indicato un deciso abbassamento delle temperature medie radianti dove si è agito sostituendo l'asfalto con spazi permeabili o dove sia stata aumentata la vegetazione. In particolare la riduzione della temperatura radiante è molto evidente nel cortile delle aule M e N e le aule P dove il parcheggio a raso è stato sostituito da due edifici e l'asfalto da un prato.

Particolato atmosferico

Il particolato atmosferico influisce negativamente sul comfort outdoor. Queste particelle possono causare problemi respiratori, irritazioni agli occhi, alla gola e al naso, e possono anche avere effetti a lungo termine sulla salute. La nostra ricerca ha

calcolato il flusso di veicoli a motore. I dati calcolati dal software mostrano come venga sempre superata la soglia consigliata dal OMS di 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in tutti i punti di controllo. In realtà, come prevedibile, il progetto del masterplan di ateneo non ha portato benefici quantificabili con questa ricerca per quanto riguarda questa variabile. Il motivo è che il Politecnico non può intervenire in modo invasivo sulla circolazione viaria attorno, può si fare piccoli interventi come il traffico leggero di fronte all'ingresso principale, ma altri fattori come il vento indeboliscono questi sforzi. L'unica strada percorribile, senza iniziative comunali, è mitigare gli effetti del particolato installando barriere vegetali o altre strutture che prevengano il disondersi all'interno della sede del particolato atmosferico derivato da auto e tutte le attività antropiche.

Le variabili che giocano un ruolo chiave nel comfort outdoor

Quando si tratta di comfort all'a-

perto, diversi fattori chiave giocano un ruolo significativo nel garantire un'esperienza piacevole e confortevole. Ecco alcuni dei fattori chiave per il comfort all'aperto:

Temperatura: la temperatura ambiente è fondamentale per il comfort all'aperto. Condizioni estreme di caldo o freddo possono influenzare notevolmente l'esperienza. È importante vestirsi in modo adeguato alla temperatura, utilizzando strati di indumenti adeguati e proteggendosi dal caldo o dal freddo intenso.

Umidità: l'umidità relativa dell'aria può influire sulla nostra percezione del calore. Nei climi umidi, l'umidità elevata può rendere l'aria più pesante e causare disagio. Al contrario, nei climi secchi, una bassa umidità può portare a secchezza delle vie respiratorie e della pelle. Considerare l'umidità è importante quando si pianificano attività all'aperto.

Ventilazione: la circolazione dell'aria può contribuire in modo

significativo al comfort all'aperto. Una leggera brezza può aiutare a rinfrescarsi durante le giornate calde, mentre una buona ventilazione può prevenire una sensazione di soffocamento o aria stagnante. La scelta di luoghi con una buona circolazione dell'aria può migliorare l'esperienza all'aperto.

Luce solare: la quantità di luce solare può influenzare il comfort esterno in vari modi. Il sole può fornire calore e luce, ma può anche essere dannoso se esposto per lunghi periodi senza protezione solare. È importante trovare un equilibrio tra l'esposizione al sole e proteggersi dai danni del sole.

Oltre a questi fattori, è importante considerare le preferenze personali e le esigenze individuali. Ciò che può essere comodo per una persona potrebbe non esserlo per un'altra, quindi è importante adattare l'esperienza all'aperto alle preferenze personali.

Le superfici: I tipi di superfici e le loro proprietà possono avere notevoli effetti sulle condizioni micro-

climatiche (Battista et al., 2016). Le principali superfici che ricopre il caso studio sono asfalto e cemento, in misura minore altri materiali lapidei e terreno a prato. L'asfalto, che è presente in maniera massiccia, contribuisce alla formazione di UHI grazie al suo basso albedo e alla non permeabilità, la riduzione delle aree asfaltate all'interno del Politecnico aiuta localmente alla diminuzione delle temperature superficiali ma difficilmente è possibile immaginare un'ulteriore riduzione di superfici asfaltate nel dintorno dell'università. La presenza di importanti arterie cittadine e la necessità di parcheggi a raso rende difficile ipotizzare che anche intorno all'università vi possa essere una riduzione sostanziale di asfalto. Le temperature superficiali risultano sempre molto elevate su gran parte della superficie modellata già a partire dalle ore 10.00 dove si raggiungono valori intorno ai 40 °C. A livello del campus però alcune scelte in direzione di colorazione delle superfici scure con colori con un alto albedo influirebbe positivamente sui livelli generali di comfort.

La vegetazione:

L'impatto significativo della vegetazione sul microclima è stato sottolineato più volte in letteratura scientifica (Battista et al., 2016).

Ha dimostrato di abbassare la temperatura dell'aria e contribuire al comfort termico, oltre a promuovere vari benefici per la salute per gli esseri umani (Berardi et al. 2020). Tutti i corsi principali che circondano la sede centrale sono caratterizzati da doppi o quadrupli filari di alberi di oltre 20 metri di altezza. Nei mesi estivi dunque i corsi più ampi e trafficati sono riparati in parte dalla radiazione solare diretta grazie alla schermatura delle foglie. Nonostante ciò al di fuori dei corsi più importanti quali la totalità della restante rete viaria non presenta vegetazione e la radiazione solare colpisce asfalto ed edifici senza schermature. Questo contribuisce, oltre all'aumento delle temperature e quindi un aumento dei consumi di energia per la climatizzazione a percepire una condizione di discomfort da parte degli occupanti. All'interno della sede gli alberi ad alto fusto, allo

stato di fatto, sono pochi e dunque contribuiscono in una minima parte a rendere accettabili le condizioni di comfort esterne di quelle aree. La destinazione di parte della superficie esterna a prato, aiuta ad abbassare le temperature superficiali (albedo erba 0,2) e l'evaporazione naturale contribuisce a percepire condizioni di comfort migliori.

/06
PROGRESSI
VERSO L'AGENDA
2030

6.1 IL LEGAME TRA MICROCLIMA E SDGS

La simulazione del microclima può essere un utile strumento per contribuire al raggiungimento degli obiettivi di sviluppo sostenibile (SDGs).

Ad esempio, gli SDGs 11 (città e comunità sostenibili) e 13 (azione sul clima) possono essere favoriti tramite l'impiego di simulazioni del microclima in ambito urbano. Queste simulazioni permettono di valutare l'impatto delle decisioni urbanistiche sul clima locale, ad esempio l'effetto dell'uso di materiali diversi per la copertura del suolo o l'effetto dell'installazione di sistemi di raffreddamento passivo o attivo.

Inoltre, gli SDGs 2 (fame zero) e 15 (vita sulla terra) possono essere promossi attraverso l'uso di simulazioni del microclima in agricoltura e nella gestione dei sistemi di irrigazione. La simulazione può infatti aiutare a ottimizzare l'uso delle risorse idriche e adottare tecniche di coltivazione sostenibili.

In generale, la simulazione del microclima può fornire informazioni utili per prendere decisioni che favoriscano lo sviluppo sostenibile, riducendo l'impatto ambientale delle

attività umane e promuovendo una maggiore resilienza dei sistemi naturali e delle comunità (Pollo et al., 2023).

Gli SDGs e il microclima sono strettamente correlati in quanto gli SDGs mirano a promuovere uno sviluppo sostenibile, che a sua volta può avere un impatto significativo sul microclima. Ad esempio, gli SDGs che mirano a ridurre le emissioni di gas a effetto serra e ad adottare fonti di energia pulita possono contribuire a mitigare gli effetti del cambiamento climatico sul microclima locale. Inoltre, gli SDGs che mirano a promuovere la conservazione delle risorse naturali e a ridurre l'inquinamento possono avere un impatto positivo sulla qualità dell'aria e dell'acqua, che a loro volta influenzano il microclima.

Allo stesso tempo, il microclima può anche influenzare la capacità di raggiungere gli SDGs. Ad esempio, le condizioni meteorologiche avverse possono ostacolare l'agricoltura e la produzione alimentare, che sono essenziali per raggiungere l'obiettivo di eliminare la fame e la

malnutrizione (SDG 2). Inoltre, il riscaldamento urbano e l'inquinamento possono avere un impatto negativo sulla salute delle persone, che è un elemento fondamentale degli SDGs.

In sintesi, gli SDGs e il microclima sono strettamente legati e promuovere lo sviluppo sostenibile può contribuire a migliorare il microclima locale e la qualità della vita delle persone che vi abitano.

Utilizzando strumenti di modellazione climatica, possiamo adattare meglio le città ai cambiamenti climatici e ridurre gli effetti delle isole di calore urbane. Questo ci aiuterà a raggiungere gli obiettivi di sviluppo sostenibile delle Nazioni Unite, in particolare gli obiettivi 11, 13 e 3. Questi strumenti possono anche aiutarci a prendere decisioni migliori sulla progettazione e la pianificazione della città. Dobbiamo continuare a migliorare l'accuratezza dei modelli climatici raccogliendo più dati dai sensori e integrandoli con i sistemi informativi geografici (GIS). Ciò aiuterà i responsabili politici e gli esperti a prendere decisioni informate su come progettare e piani-

ficare le città in modo da avvantaggiare tutti e prepararsi per il futuro.

Come detto nel capitolo 2, gli SDGs legati al microclima e al comfort termico, seppur senza citazioni dirette a questi concetti, sono SDG 3, 7, 11 e 13.

6.2 POTENZIALI PROGRESSI

Il legame tra la mitigazione delle UHI e gli sdgs e i suoi target viene evidenziato da alcuni obiettivi che legano il benessere delle persone alla qualità degli spazi e al comfort termico, riportati a seguire.

Target 3.9 pone l'intenzione di ridurre il numero di morti e malattie legato all'inquinamento dell'aria.

Target 7.3 invece impegna i governi a raddoppiare il miglioramento dell'efficienza energetica degli edifici.

Target 11.6 entro il 2030, ridurre l'impatto ambientale negativo pro capite delle città, anche prestando particolare attenzione alla qualità dell'aria e alla gestione dei rifiuti urbani e di altro tipo.

Target 11.7 entro il 2030, fornire l'accesso universale a spazi verdi e pubblici sicuri, inclusivi e accessibili, in particolare per donne e bambini, persone anziane e persone con disabilità.

Target 11.b aumentare sostanzialmente il numero di città che adottano e attuano politiche e piani integrati per l'inclusione, l'efficienza delle risorse, la mitigazione e l'adattamento ai cambiamenti climatici.

Target 13.1 Rafforzare la resilienza e la capacità di adattamento ai pericoli legati al clima e ai disastri naturali in tutti i Paesi

Target 13.2 Integrare le misure relative al cambiamento climatico nelle politiche, nelle strategie e nella pianificazione nazionali.

Target 13.3 Migliorare l'educazione, la sensibilizzazione e la capacità umana e istituzionale sul cambiamento climatico mitigazione, adattamento, riduzione dell'impatto e preallarme.

I risultati

La lettura del confronto tra i dati delle due simulazioni, ci ha permesso di confermare le ipotesi iniziali di un generale, seppur non diffuso omogeneamente, miglioramento delle condizioni di microclima come conseguenza degli interventi del masterplan di Ateneo. Conseguenza diretta di questo diffuso miglioramento delle condizioni di comfort è il progressivo avvicinarsi ad alcuni degli SDGs individuati come rilevanti per la qualità del comfort e degli indici di benessere per l'uomo. In alcuni dei punti di controllo (Figura 5.7.1) si è raggiunto una riduzione di circa

il -25% sia per la PET che la temperatura superficiale, con una media di circa -15% per la Physiological Equivalent Temperature e -12% per quanto riguarda la temperatura superficiale. La riduzione complessiva dei valori medi di PET e temperature superficiali, aiuta il punteggio di alcuni targets come **13.1** (rafforzare la capacità di adattamento al clima), **11.6** (ridurre l'impatto globale pro capite) e soprattutto **3.7** (radoppiare il miglioramento dell'efficienza energetica degli edifici e contenimento dei consumi) in quanto temperature effettivamente inferiori e miglioramento della percezione del comfort (PET) portano ad un consumo minore di energia per l'alimentazione di impianti di raffrescamento come conseguenza di minori temperature esterne.

L'aumento delle superfici verdi permeabili del 60%, nonostante una densificazione maggiore del lotto, porta la riduzione delle temperature superficiali delle superfici, mitigando l'aumento delle temperature causato dal cambiamento climatico. I targets **13.2** (strategie e piani nazionali le misure di contrasto ai cambiamenti

climatici) e **11.7** (fornire l'accesso universale a spazi verdi pubblici) sono legati agli interventi di permeabilizzazione del terreno e della densificazione della vegetazione portati avanti dal masterplan. Tuttavia, il contributo principale degli approcci di modellazione climatica è legato indicatori SDG 13, che possono favorire l'impiego di approcci di modellazione quando si tratta di valutare gli interventi che affrontano la mitigazione del rischio di catastrofi, le strategie locali per l'adattamento al cambiamento climatico, l'adozione di piani di adattamento e la comunicazione dei rischi derivanti dai pericoli climatici.

Il potenziale miglioramento delle concentrazioni di particolato sottile PM_{10} e $PM_{2.5}$ non può essere quantificato dalla simulazione, in quanto non sono state previste nessuna variazione della circolazione o limiti alla circolazione dalla masterplan. Di conseguenza il target 3.9 non può subire un miglioramento a seguito dell'analisi dei dati di questa ricerca.

In conclusione possiamo affermare che un miglioramento nella classi-

fica del ranking dell'università in e merito alla corsa ai targets dell'Agenda 2030 sia plausibile e probabile specie per alcuni dei sdg quali **3, 11 e 13**.

In generale gli interventi previsti dal progetto sono tutti concentrati ad un miglioramento delle condizioni di comfort degli studenti, dei docenti e di tutti gli users del università.

6.3 PROSPETTIVE FUTURE / NATURE BASED SOLUTIONS

Sebbene il masterplan di progetto porti con sé un miglioramento diffuso delle condizioni di comfort alla sede centrale del Politecnico, rimangono critiche le condizioni di benessere termico che gli occupanti degli spazi esterni provano. I dati riguardanti la PET e le temperature superficiali, viste precedentemente, nonostante siano caratterizzate da una diminuzione generale presentano valori alti, superiori alla soglia di benessere della scala di comfort che questi indici rappresentano. Infatti, raramente i valori della PET è pari o inferiore al livello di moderate heat stress (figura 2.7.1), questo indica come anche con il miglioramento di questi indici la sensazione percepita dagli occupanti degli spazi outdoor della sede centrale del Politecnico di Torino sia comunque di disagio. La ricerca ci ha permesso però di localizzare le aree ancora critiche per quanto riguarda comfort outdoor, la conoscenza dei luoghi in cui poter intervenire e l'entità del disagio percepito rende la progettazione e la

scelta della soluzione architettonica più rapida e mirata. Nell'ultima parte di questo lavoro, ci si è concentrati su come eventuali nature based solutions potrebbero contribuire ulteriormente ad abbassare il valore degli indici di comfort in modo da aumentare gli spazi outdoor in cui gli occupanti possano provare condizione di benessere anche nelle calde giornate estive, con un limitato consumo di energie e risorse.

EU policies

La Commission Europea definisce le NBS come "soluzioni ispirate e sostenute dalla natura, che sono efficaci dal punto di vista dei costi e offrono contemporaneamente benefici ambientali, sociali ed economici contribuendo a costruire la resilienza". Tali soluzioni portano nelle città una maggiore e più varia presenza di processi naturali, evidenziando come "le soluzioni nature based siano vantaggiose per la biodiversità e gli ecosistemi" (Haines et al., 2020).

Le comunità urbane e rurali fanno grande affidamento su infrastrutture e sistemi "convenzionali" per l'approvvigionamento idrico, il riscaldamento, l'illuminazione, il drenaggio, il raffreddamento e altri servizi, come i luoghi di ritrovo o di relax. Molti di questi sistemi tradizionali potrebbero non essere più adatti alla luce dei cambiamenti globali, i cui impatti si fanno sentire con sempre maggiore gravità e frequenza. Le NBS offrono, quindi, un'importante opportunità di innovazione con la possibilità di fornire benefici duraturi e tangibili a diversi gruppi sociali ed in una serie di contesti ambientali, economici e culturali. Tuttavia, molte NBS rimangono soluzioni relativamente nuove nel contesto dell'UE e presentano, dunque, importanti sfide in termini di progettazione, funzionamento, manutenzione e organizzazione della loro realizzazione. L'intenzione di adottare una strategia dell'UE più ambiziosa sull'adattamento ai cambiamenti climatici è delineata anche nel Green Deal, citando la necessità di "rafforzare gli sforzi per contrastare l'antropizzazione del clima e garantire investimenti pubblici

e privati nelle NbS" (Pauleit et al., 2017).

Nature based solutions

Il concetto di 'Nature based Solutions' (NbS) è stato introdotto verso la fine degli anni 2000 dalla Banca Mondiale (MacKinnon et al. 2008) e dall'IUCN (International Union for Conservation of Nature) per evidenziare l'importanza della conservazione della biodiversità per la mitigazione dei cambiamenti climatici. Le NbS sono state proposte dall'IUCN nel contesto dei negoziati sui cambiamenti climatici a Parigi del 2015 "come un modo per mitigare e adattarsi ai cambiamenti climatici, garantire acqua, cibo ed energia, ridurre la povertà e guidare la crescita economica" (IUCN 2014).

Pertanto, le NbS pongono un'enfasi esplicita sul collegamento della conservazione della biodiversità con obiettivi per uno sviluppo sostenibile e resiliente ai cambiamenti climatici e rappresentano "soluzioni" innovative e attuabili. Le NbS possono essere efficaci in termini di costi e i vantaggi vanno dalla protezio-

ne dell'ambiente alla creazione di posti di lavoro e alla stimolazione dell'innovazione verso un'economia verde. La Commissione Europea ha adottato il concetto di soluzioni nature based per il suo programma di ricerca Horizon 2020¹ con un focus esplicito sulle aree urbane (European Commission, 2015).

In termini di adattamento, le NbS possono ridurre l'impatto delle isole di calore urbane, aumentando la copertura arborea o impiegando, per esempio, materiali ad alta albedo. Oltre a ridurre l'esposizione al rischio, questo tipo di soluzioni può creare resilienza attraverso spazi esterni freschi che fungono da rifugio per le persone come riparo dal caldo urbano. Per mitigare l'effetto dell'isola di calore urbana e migliorare la vivibilità complessiva, le città con l'integrazione delle infrastrutture verdi, possono ridurre le temperature, migliorare la qualità dell'aria, gestire le acque meteoriche, conservare la biodiversità e migliorare il benessere dei residenti urbani. L'adozione di queste soluzioni non solo combatterà l'effetto isola di calore urbana, ma aprirà anche la strada

a città più verdi e vivaci del futuro.

Approcci per mitigare l'effetto delle UHI

Le soluzioni naturali offrono strategie efficaci per mitigare l'effetto isola di calore urbana (UHI), integrando elementi naturali nei paesaggi urbani, come spazi verdi, alberi e vegetazione, le città possono creare un microclima più equilibrato e ridurre l'intensità dell'effetto UHI.

Uno dei principali vantaggi delle NbS è la **riduzione delle temperature dell'aria e delle superfici**. La vegetazione fornisce ombra, assorbe la radiazione solare e facilita il raffreddamento per evaporazione attraverso la traspirazione. Gli alberi piantati strategicamente nelle aree urbane possono creare un riparo naturale che protegge gli edifici, le strade e i marciapiedi dalla luce solare diretta, riducendo le temperature della superficie e dell'aria. Inoltre, i tetti verdi e i giardini verticali, superfici riflettenti e schermature solari possono essere incorporati nei progetti degli edifici per ridurre al minimo l'assorbimento di calore favorendo il raffreddamen-

1. Horizon 2020 è lo strumento di finanziamento alla ricerca scientifica e all'innovazione della Commissione europea dotato di un budget tra i più alti del mondo: quasi 80 miliardi di euro, per sette anni dal 2014 al 2020. I fondi stanziati sono a gestione diretta. Fonte: <https://horizon2020.apre.it/>

to e migliorare la qualità dell'aria. Aumentando la copertura vegetale, le città possono mitigare la concentrazione di inquinanti nocivi, tra cui il biossido di azoto e il monossido di carbonio. La presenza di alberi e piante aumenta inoltre la produzione di ossigeno riducendo l'impronta di carbonio delle aree urbane.

Le strategie adatte agli spazi urbani sono descritte di seguito.

Aumento della superficie verde/vegetazione

Le foreste urbane (Figura 6.3.3) sono una soluzione chiave per mitigare l'effetto isola di calore urbana e migliorare la sostenibilità complessiva delle città. Per foresta urbana si intende un insieme di alberi, vegetazione e spazi verdi all'interno di un'area urbana che riproduce le funzioni e i benefici delle foreste naturali. Incorporando le foreste urbane nella pianificazione e nello sviluppo delle città, si possono ottenere numerosi vantaggi ambientali, sociali ed economici.

Le foreste urbane agiscono come fil-

tri naturali dell'aria, assorbendo gli inquinanti e il particolato dall'atmosfera, migliorando la qualità dell'aria.

Le acque meteoriche vengono gestite più efficacemente, intercettandole, riducendo l'intensità delle piogge che raggiungono il suolo e minimizzando il deflusso superficiale.

Diventano habitat importanti per un'ampia gamma di specie vegetali e animali, questi corridoi ecologici supportando il movimento della fauna selvatica all'interno delle aree urbane promuovendo la diversità delle specie e migliorano la resilienza degli ecosistemi urbani.

Gli alberi delle foreste urbane agiscono poi come barriere acustiche naturali, riducendo l'inquinamento acustico prodotto dal traffico, dalle industrie e da altre fonti. In più, la presenza di spazi verdi e di alberi migliora il valore estetico delle città, contribuendo alla qualità complessiva e creando un senso di benessere per i residenti.

Infine, le foreste urbane riducono gli effetti dell'isola di calore ombreggiando le superfici degli edifici, svolgendo un ruolo attivo nella

regolazione del calore, deviando la radiazione solare e rilasciando umidità nell'atmosfera. Le superfici ombreggiate possono essere più fresche di 11–25°C (Wong et al., 2017) rispetto alle temperature massime delle superfici non ombreggiate. L'evapotraspirazione, da sola o in combinazione con l'ombreggiamento, può aiutare a ridurre le temperature massime estive di 1–5°C (Wong et al., 2017).

Come diretta conseguenza della regolazione del calore, esse contribuiscono alla **riduzione del rischio di stress da calore** riducendo il calore nell'ambiente edificato. La riduzione del caldo estremo nelle città porta una serie di benefici, tra cui la riduzione della mortalità, la riduzione dei costi energetici e delle emissioni di anidride carbonica e una migliore produttività del lavoro (Wong et al. 2017).

Coperture e facciate verdi

Queste soluzioni includono l'aggiunta di superfici verdi per costruire tetti e facciate (Figura 6.3.6), creando opportunità per catturare, immagaz-

zinare e riutilizzare l'acqua piovana, migliorare la qualità dell'aria e ridurre le temperature superficiali. Forniscono vantaggi sia in termini di riduzione del calore sia di riduzione dei costi di mantenimento degli edifici.

Nel caso dei **tetti verdi intensivi** possono ospitare un'ampia varietà di specie vegetali, dalle graminacee ai piccoli arbusti fino agli alberi, supportati da uno spessore del substrato normalmente superiore a 25 cm. Qui la manutenzione è necessaria per la fertilizzazione, l'irrigazione e la potatura delle piante. Di contro, i **tetti verdi estensivi** sono realizzati con specie vegetali come arbusti e prato, poste su uno strato di substrato di spessore compreso tra 8 e 15 cm di profondità, richiedendo meno manutenzione e meno acqua. Quest'ultima tipologia è la più diffusa in quanto più leggera e quindi più facilmente installabile rispetto a tetti intensivi. Spesso poi questi sistemi non richiedono l'installazione di un sistema di irrigazione dedicato, con costi più contenuti (Eisenberg et al., 2020).

Le soluzioni verticali, sono molto si-

mili a quelle orizzontali, e le **facciate verdi con radici a terra** sono un tipo di parete verde con piante rampicanti radicate direttamente a terra. Le piante rampicanti possono crescere direttamente sul muro o su un apposito telaio ed esse estraggono acqua e sostanze nutritive dal terreno a livello del suolo e l'irrigazione non è sempre necessaria (Eisenberg et al., 2020).

Le **facciate verdi sospese** sono un tipo di parete verde che utilizza invece l'irrigazione e substrati speciali, per ridurre il peso a carico delle facciate e consentire la crescita delle piante (Polcher 2020). Sono più costosi dell'inverdimento da terra e richiedono un maggiore utilizzo delle risorse nella costruzione e nella manutenzione (Iwaszuk et al. 2019).

Lo strato vegetale di un tetto verde e di una facciata verde assorbe la radiazione solare proteggendo la trasmissione del calore all'interno dell'edificio, agendo sulla **termoregolazione**. Riduce, inoltre, la temperatura dell'edificio e raffredda l'aria circostante (Gehrels et al. 2016). Diversi studi dimostrano che

le temperature dei tetti verdi possono essere inferiori di 16–22°C (Iwaszuk et al. 2019) rispetto a quelle dei tetti convenzionali e se si trasformasse l'80-90% dei tetti di una città in tetti verdi, essi ridurrebbero la temperatura dell'aria con un valore compreso tra 0,3°C e 3°C (Santamoursi 2014).

Miglioramento delle condizioni di comfort ambientale

avviene intercettando, assorbendo e riflettendo la radiazione solare, proteggendo la superficie della parete (Hiemstra 2012). La diminuzione della temperatura ambiente e l'uso ridotto dell'aria condizionata aiutano a mitigare l'effetto dell'isola di calore urbana aiutando anche ad abbassare le temperature della città di notte (Bowler et al. 2010).

Corridoi verdi

I corridoi verdi (Figura 6.3.4) sono una parte essenziale dell'ecologia del paesaggio urbano. Queste strisce di alberi, piante o vegetazione possono essere trovate su una vasta gamma di scale e tipicamente collegano gli spazi verdi in una città, creando una rete di infrastrutture

urbane verdi. I corridoi verdi completano gli spazi verdi in una città, proteggono l'habitat naturale e in genere aumentano l'habitat urbano delle specie animali.

Il potenziale dei corridoi verdi sulla **regolazione del calore** dipende in gran parte dall'altezza e dalla densità delle chiome degli alberi presenti all'interno del corridoio, in media però la chioma di un albero riduce la temperatura di 1–5°C rispetto a un'area aperta e di 11–17°C rispetto a un parcheggio asfaltato. Un aumento del 10% della copertura alberata in una città riduce la temperatura massima dell'aria a mezzogiorno di circa 1°C (Palette et al., 2020).

Urban farming

L'agricoltura urbana (Figura 6.3.5) prevede la coltivazione di colture e la produzione di cibo all'interno dei paesaggi urbani integrando le pratiche agricole nel tessuto urbano. L'agricoltura urbana riduce la dipendenza da fonti alimentari lontane e rafforza la produzione alimentare locale oltre a promuovere pratiche agricole sostenibili, tra cui l'agricol-

tura biologica e l'uso di tecniche di coltivazione verticale, che massimizzano lo spazio e le risorse limitate. L'urban farming contribuisce alla sostenibilità ambientale riducendo l'impronta di carbonio associata alla produzione, al trasporto e lo spreco di cibo oltre a generare opportunità economiche e creazione di posti di lavoro. Questa soluzione può anche contribuire alla riqualificazione urbana, trasformando aree abbandonate in spazi produttivi, attirando imprese e promuovendo lo sviluppo economico locale.

Bioretention areas

Le aree di bio-ritenzione (Figura 6.3.2) sono soluzioni progettate per gestire il deflusso delle acque meteoriche e migliorare la qualità dell'acqua nelle aree urbane catturando, immagazzinando e trattando l'acqua piovana, consentendole di infiltrarsi naturalmente nel terreno. Le aree di bio-ritenzione agiscono come sistemi naturali di gestione delle acque meteoriche, catturando e filtrando l'acqua piovana e raccogliendo le acque di dilavamento delle superfici impermeabili, come

tetti e strade, e le lasciano filtrare lentamente nel terreno.

La qualità dell'acqua viene migliorata rimuovendo gli inquinanti dalle acque meteoriche con il passaggio nel sistema di bio-ritenzione attraverso strati di vegetazione, terreno e materiali ingegnerizzati, che agiscono da filtri.

Queste soluzioni contribuiscono alla resilienza ai cambiamenti climatici mitigando l'impatto di eventi meteorologici estremi e a ridurre l'effetto isola di calore nelle aree urbane, fornendo raffreddamento per evaporazione. Infine, l'infiltrazione di acqua piovana nel terreno reintegra le riserve di acqua sotterranea, contribuendo al bilancio idrico complessivo delle città (Haberman et al. 2014).

Materiali riflettenti ad alta albedo

I materiali riflettenti ad alta albedo (Figura 6.3.1) sono vernici o rivestimenti progettati per riflettere una quantità significativa di radiazioni solari in entrata, anziché assorbirle. Questi materiali possiedono proprietà che consentono loro di far

riflettere efficacemente la radiazione solare, riducendo la quantità di calore assorbita e contribuendo a rendere l'ambiente più fresco.

I materiali riflettenti con un'elevata albedo sono spesso caratterizzati dalla capacità di riflettere un'ampia porzione dello spettro elettromagnetico, in particolare la luce visibile e il vicino infrarosso e in grado di ridurre al minimo l'assorbimento dell'energia solare ed evitare così un eccessivo riscaldamento delle superfici.

Questi materiali possono essere disponibili in varie forme e applicazioni, come vernici e rivestimenti riflettenti formulati con pigmenti o additivi speciali che ne migliorano le proprietà riflettenti. Questi vengono tipicamente applicati a superfici come tetti, pareti e pavimentazioni.

Alcuni materiali, adatti invece alle coperture, sono progettati per riflettere una quantità significativa di luce solare lontano dagli edifici,

Infine poi, i materiali per pavimenti e superfici stradali, come il cemento o l'asfalto di colore chiaro riflettono più luce solare rispetto alle tradizionali superfici scure, mitigando

l'effetto isola di calore urbana e migliorando il comfort dei pedoni e abbassando la temperatura superficiale.

L'uso di materiali riflettenti con un'elevata albedo è utile per mitigare l'impatto dell'accumulo di calore, migliorare l'efficienza energetica e ridurre l'impatto ambientale complessivo di edifici e aree urbane. Riflettendo una parte maggiore della luce solare nell'atmosfera, questi materiali contribuiscono a creare un ambiente costruito più sostenibile e confortevole.

Schermature solari

Le schermature solari possono contribuire a migliorare il comfort durante le attività all'aperto, fornendo protezione dal sole e dai raggi UV. Questi elementi architettonici sono progettati per offrire ombra in grado di ridurre l'esposizione diretta alla luce solare e limitando così il surriscaldamento e l'abbagliamento.

Inoltre, queste schermature possono migliorare il comfort termico all'aperto riducendo la sensazione di calore eccessivo contribuendo ad abbassare i valori della PET.

L'ombreggiatura solare aiuta anche a ridurre la richiesta di sistemi di condizionamento e raffreddamento, diminuendo così il consumo energetico e le emissioni di gas serra piantando strategicamente alberi e vegetazione per ombreggiare finestre, tetti e aree esterne o posizionando determinate strutture ombreggianti con telai lignei o metallici.

Comfort esterno e regolazione del microclima urbano,

l'ombreggiatura solare degli spazi esterni, come parchi, piazze e marciapiedi, crea aree confortevoli per le persone che si riuniscono, si rilassano e si dedicano ad attività all'aperto. Le aree ombreggiate offrono sollievo dal calore diretto del sole, rendendo gli spazi esterni più invitanti e piacevoli, soprattutto nei caldi mesi estivi.

L'ombreggiatura solare aiuta a regolare i microclimi urbani riducendo l'effetto isola di calore urbana.

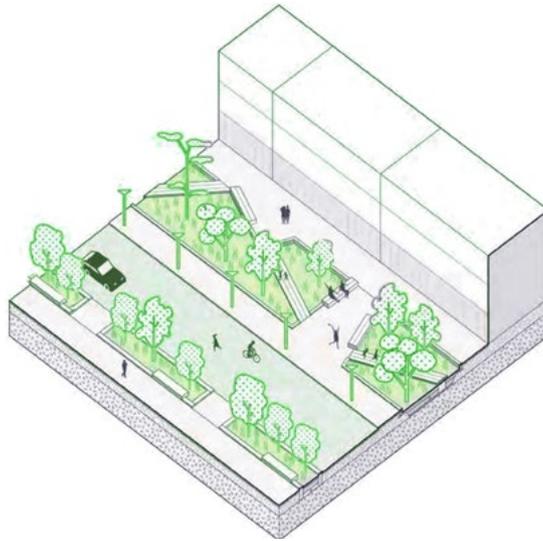


Figura 6.3.1 - Nbs materiali riflettenti a bassa albedo. Fonte: Felixx catalogue

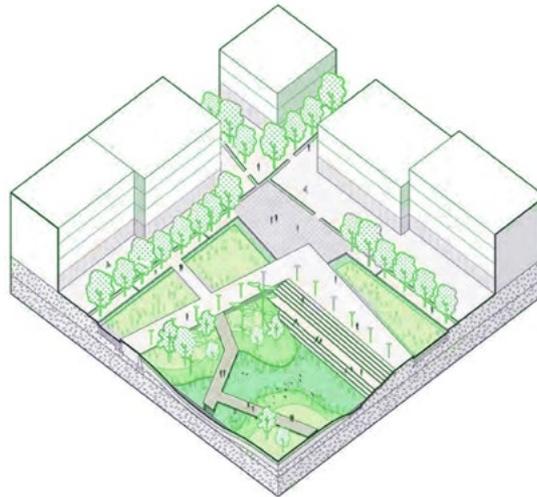


Figura 6.3.2 - NbS, bio-retention
Fonte: Felixx catalogue



Figura 6.3.3 - NbS, urban forest
Fonte: Felixx catalogue

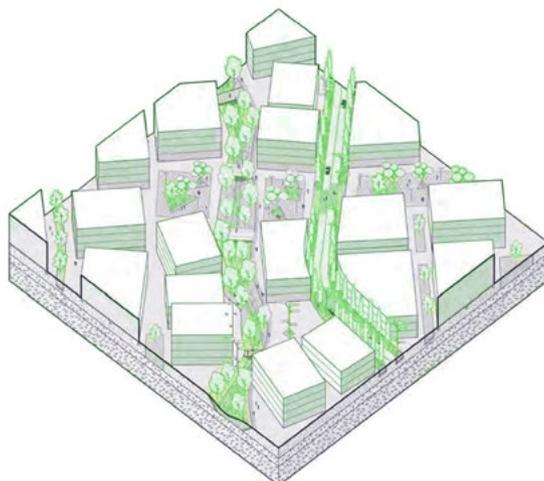


Figura 6.3.4 - NbS, urban corridor.
Fonte: Felixx catalogue

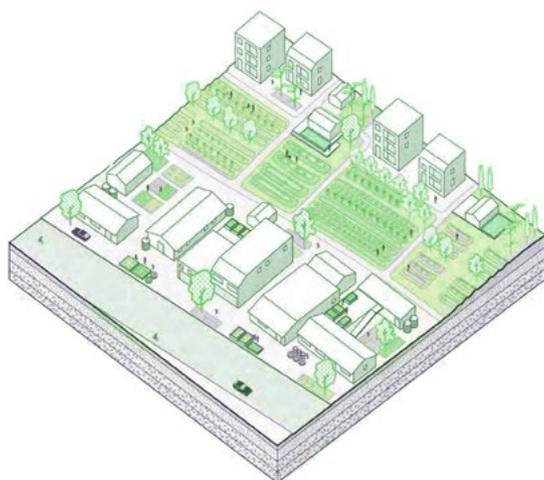


Figura 6.3.5 - NbS, urban farm. Fonte:
Felixx catalogue

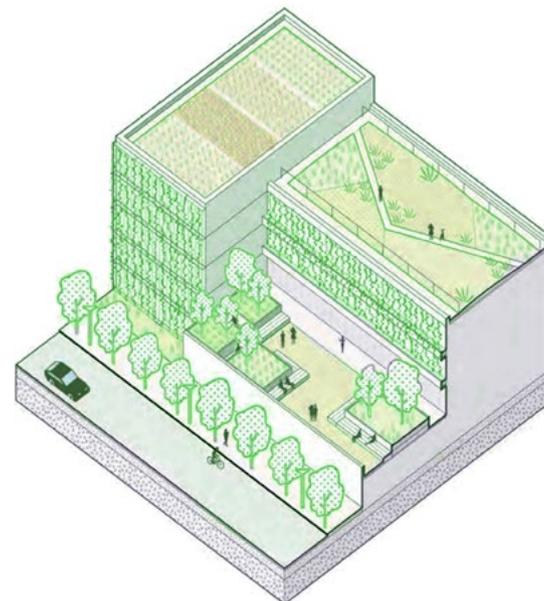


Figura 6.3.6 - NbS, green roof and
green facade. Fonte: Felixx catalogue

6.4 APPLICAZIONI NBS AL POLITECNICO

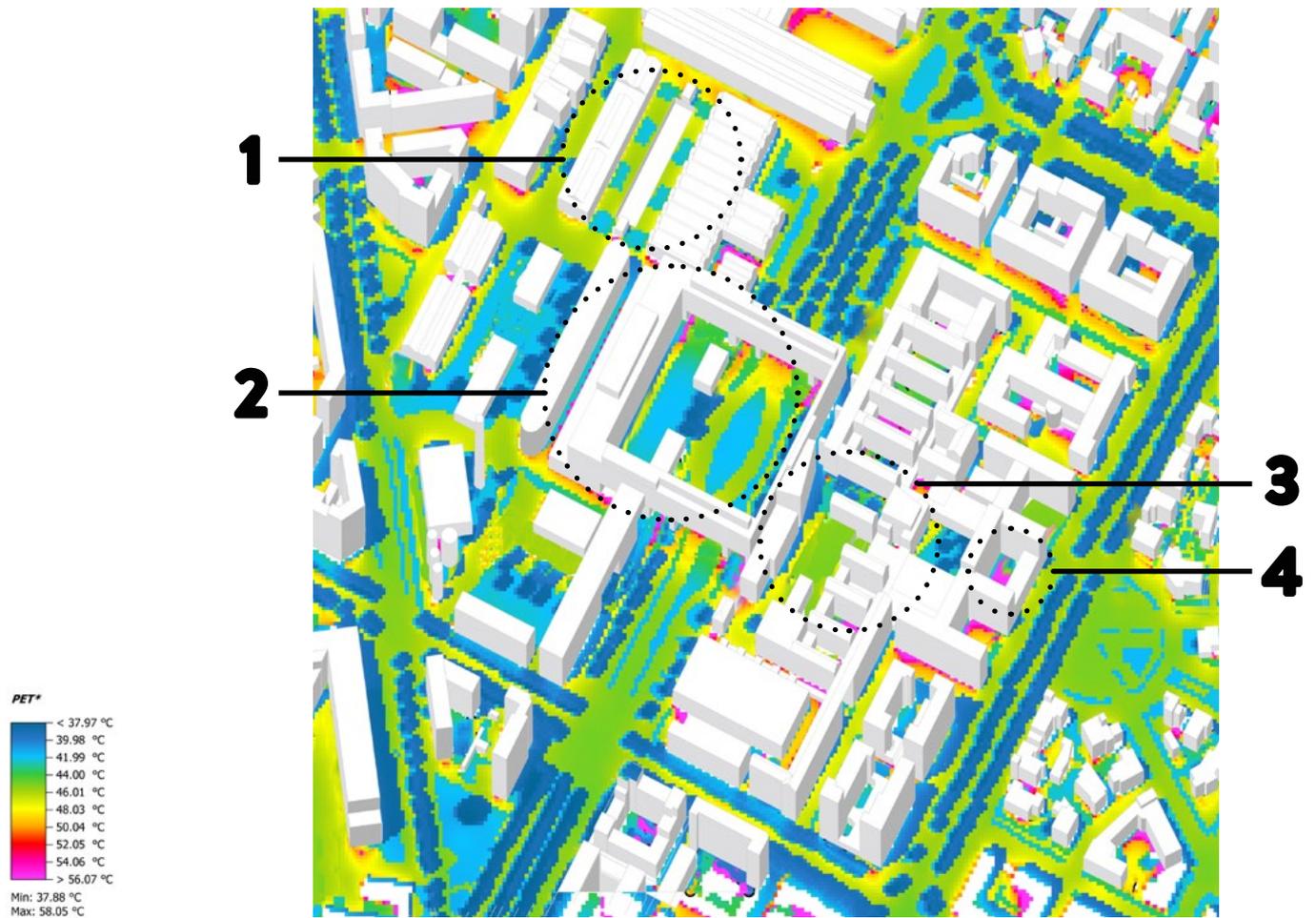


Figura 6.4.1 - Assonometria masterplan/PET ore 15

Quest'ultima parte della ricerca è riservata alle suggestioni su come si potrebbe potenzialmente implementare il Masterplan di Ateneo, attraverso soluzioni architettoniche nature based con l'obiettivo di migliorare le condizioni di comfort degli spazi outdoor. Questa sezione pertanto non porta con sé prove scientifiche e simulazioni microclimatiche dell'effettivo miglioramento delle condizioni sopracitate grazie agli interventi proposti ma si affida alla letteratura scientifica e alle soluzioni nature based elencate nel capitolo 6.3.

La scelta delle aree su cui vengono ipotizzati gli interventi nature based sono stati individuati analizzando l'assonometria della P.E.T. del masterplan di progetto alle ore 15:00 del 25 luglio 2022. Il criterio usato è stato individuare sulla mappa i punti più critici, in termini di valori di P.E.T., e pensare la scelta progettuale più adatta per i singoli casi. Sono dunque stati individuati **quattro siti** che presentano alti

valori di PET e temperature superficiali e per ognuno dei quali si è provveduto ad pensare l'applicazione di una o più soluzioni di mitigazione delle UHI.

In particolare nel **caso 1** si toccano valori intorno ai 46 °C, e data le caratteristiche architettoniche del sito, non adatto a interventi in grado di aumentare la vegetazione, la tecnologia impiegata sarebbe la **schermatura solare**, attraverso un sistema di tessuti. Qui la struttura è di carpenteria metallica e il corpo ombreggiante è di tessuto, l'idea e quella di creare uno spazio outdoor ombreggiato e attrezzato per attività all'aperto. La scelta di questa soluzione è anche dovuta al fatto che l'area è di fatto un tetto pensile estensivo e la piantumazione di alberi ad alto fusto risulta impossibile come metodo alternativo di ombreggiamento.

Il **caso 2**, presenta valori di P.E.T. intorno ai 43 °C, ma la particolarità dell'area è la presenza di un'ampia piazza in parte verde che non presenta un ombreggia-

mento naturale rilevate, la tecnologia progettata è dunque quella delle facciate verdi al fine di proteggere gli edifici dalla radiazione diretta del sole e dunque di abbassare la richiesta di energia per la climatizzazione estiva.

Qui, sugli affacci sulla corte del sovrappasso e le le facciate del raddoppio, si prevede invece la copertura delle facciate dei corpi verticali dei cosiddetti "scavalchi" con una facciata verde sospesa, Gli interventi orizzontali invece prevedono la piantumazione di alberi e strutture leggere come schermatura solare.

Nel **caso 3**, invece, i valori di P.E.T superano i 47 °C e lo spazio aperto è quasi completamente impermeabile, la soluzione individuata è dunque una simbiosi tra l'uso di **materiali riflettenti ad alta albedo** e l'**urban forest**.

Nelle corti principali della sede storica, qui vengono piantate nuove alberature, sostituita la pavimentazione con una più chiara e strutture ipogee per ristoro e par-

cheggio delle biciclette.

Nel **caso 4**, la P.E.T. raggiunge i 54 °C, e si sceglie come approccio i **tetti verdi** e la **schermatura solare**.

Sulle corti pavimentate del ingresso principale, è stata pensata una soluzione di schermatura solare con telaio ligneo su cui la vegetazione va a costituire l'apparato ombreggiante.

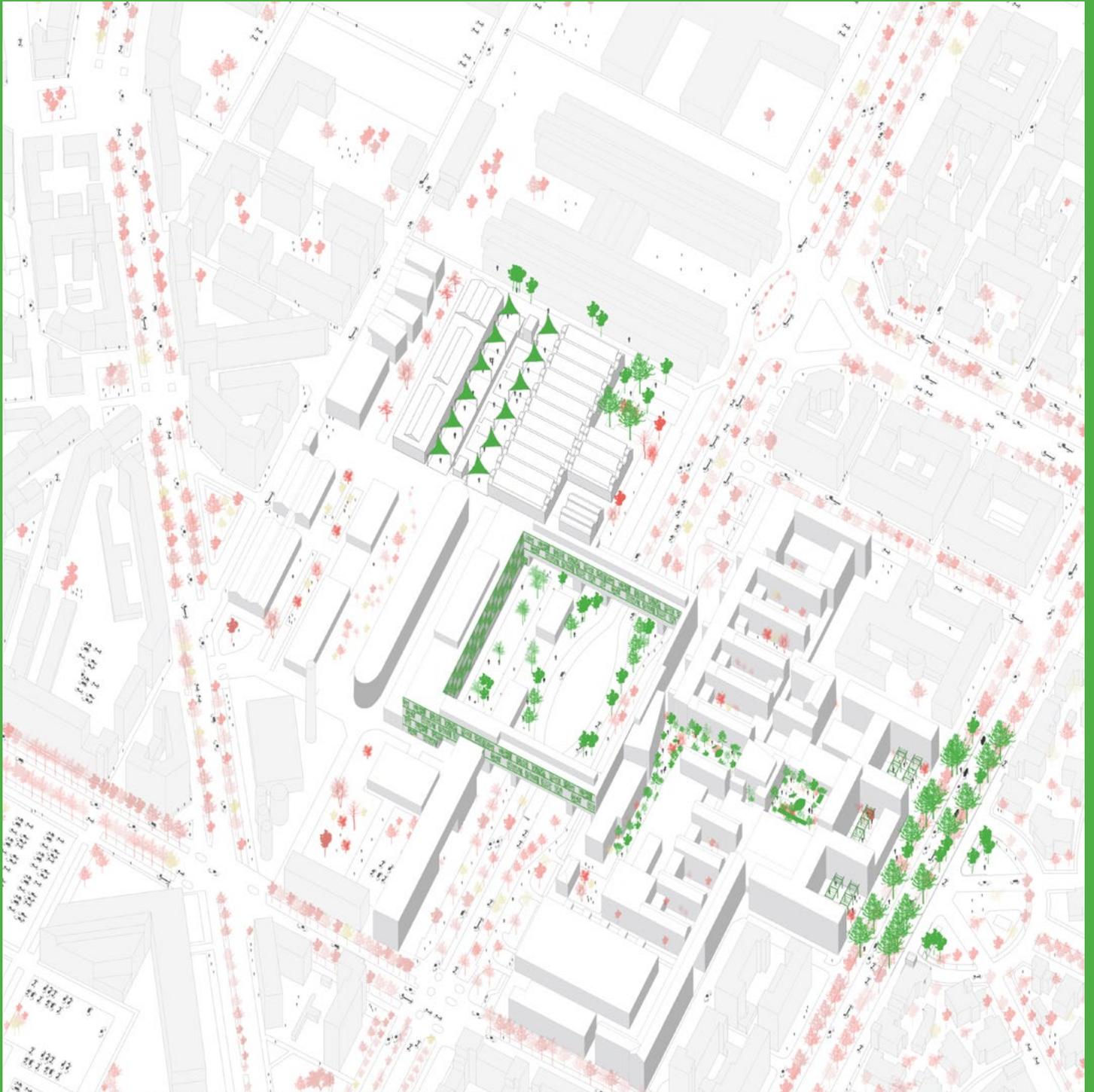


Figura 6.4.2 - nature based solution applicata al Politecnico

CASO 1

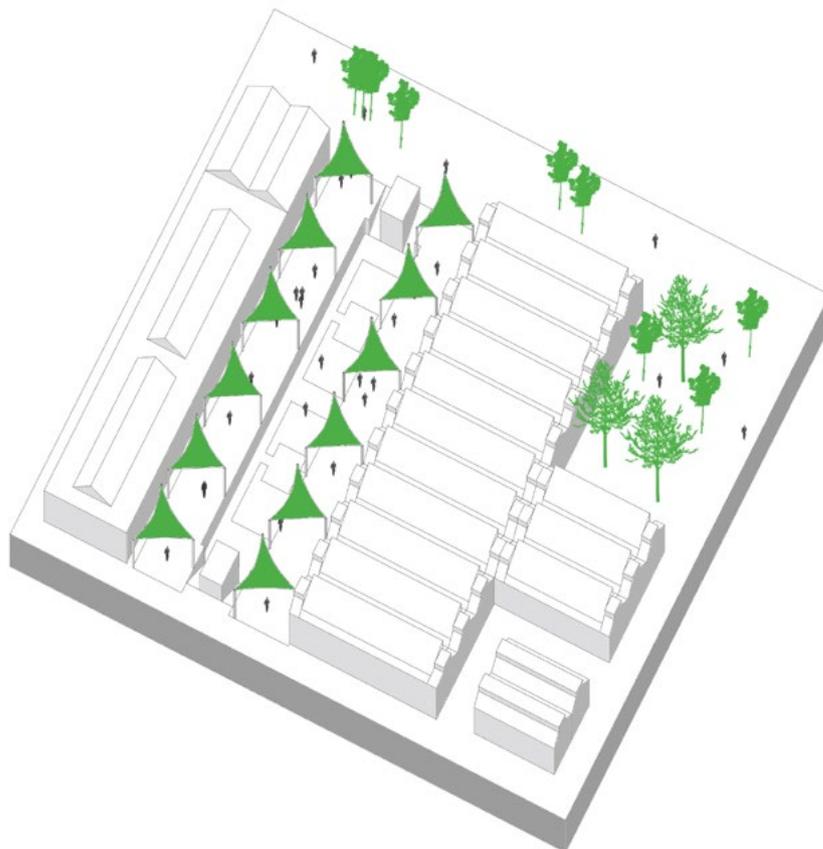


Figura 6.4.3 - Nbs Caso 1 - assonometria dell'intervento

Figura 6.4.4 - Immagine evocativa dell'intervento del caso 1



CASO 2

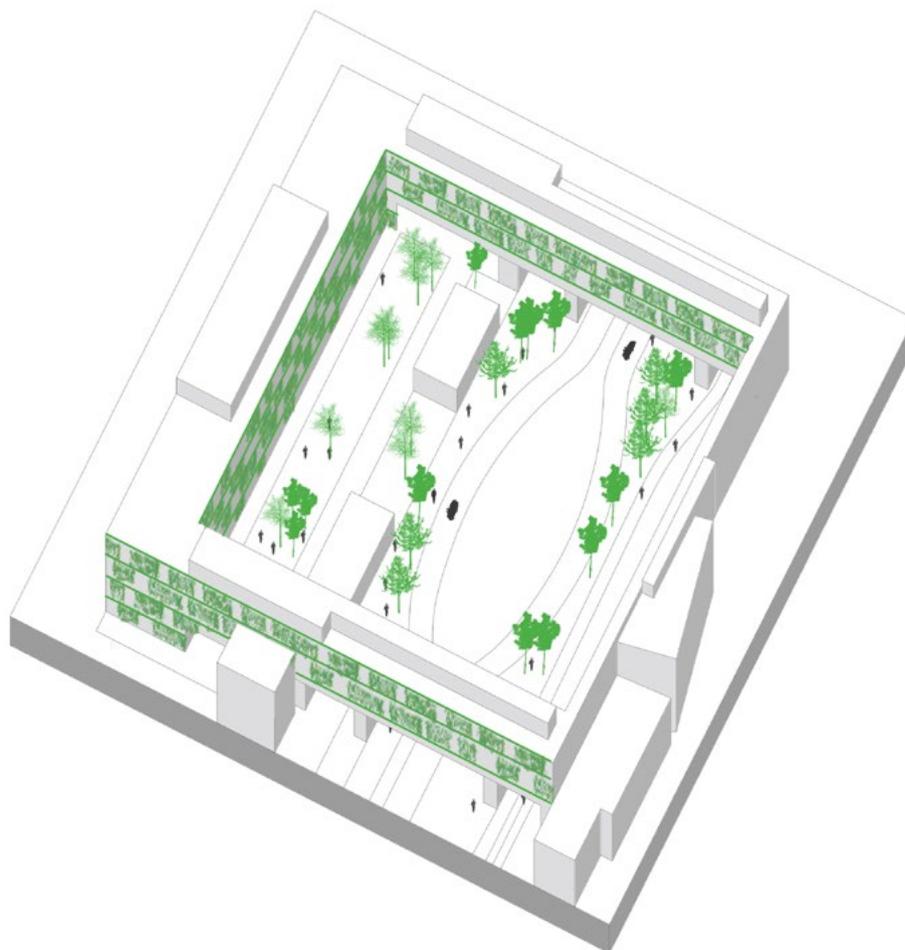


Figura 6.4.5 - NbS Caso 2 - assonometria dell'intervento



Figura 6.4.6 - Immagine evocativa dell'intervento del caso 2



CASO 3

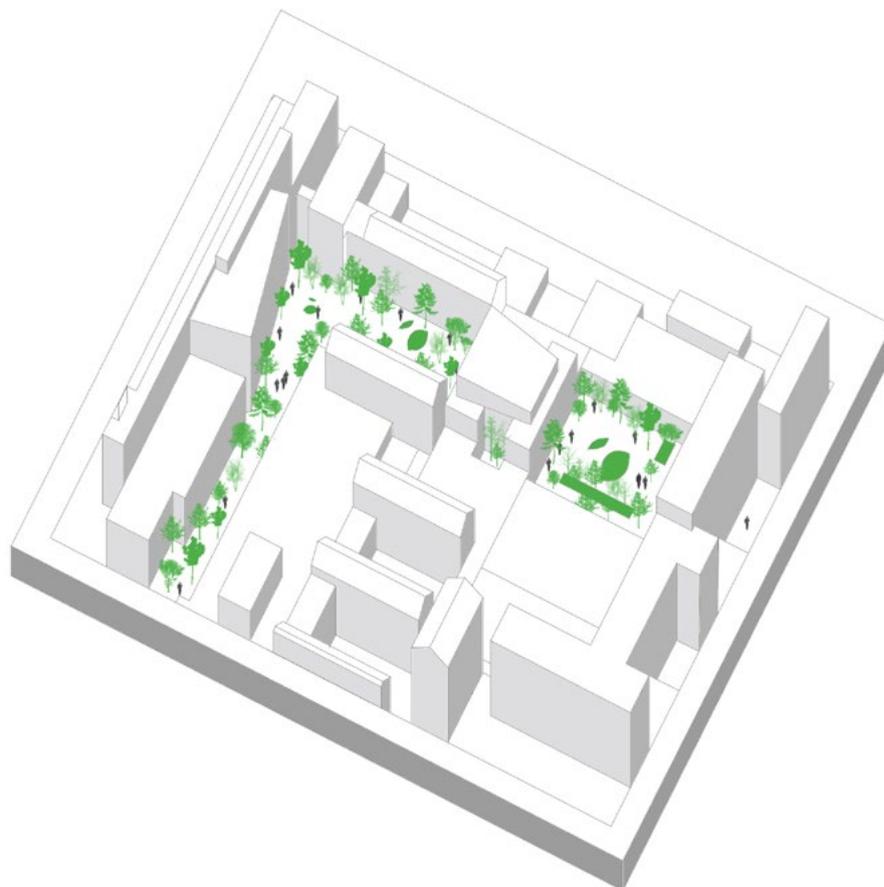


Figura 6.4.7 - NbS Caso 3 - assonometria dell'intervento

Vista evocativa dell'intervento ha come riferimento l'intervento architettonico (2014-2019) progettato per l'università di Copenaghen da COBE Architecture Fonte: <https://www.cobe.dk/>

Figura 6.4.7 - Immagine evocativa dell'intervento del caso 3
Riferimento architettonico: Karen Blixens Plads, Copenhagen, 2019 **COBE - Architecture**



CASO 4

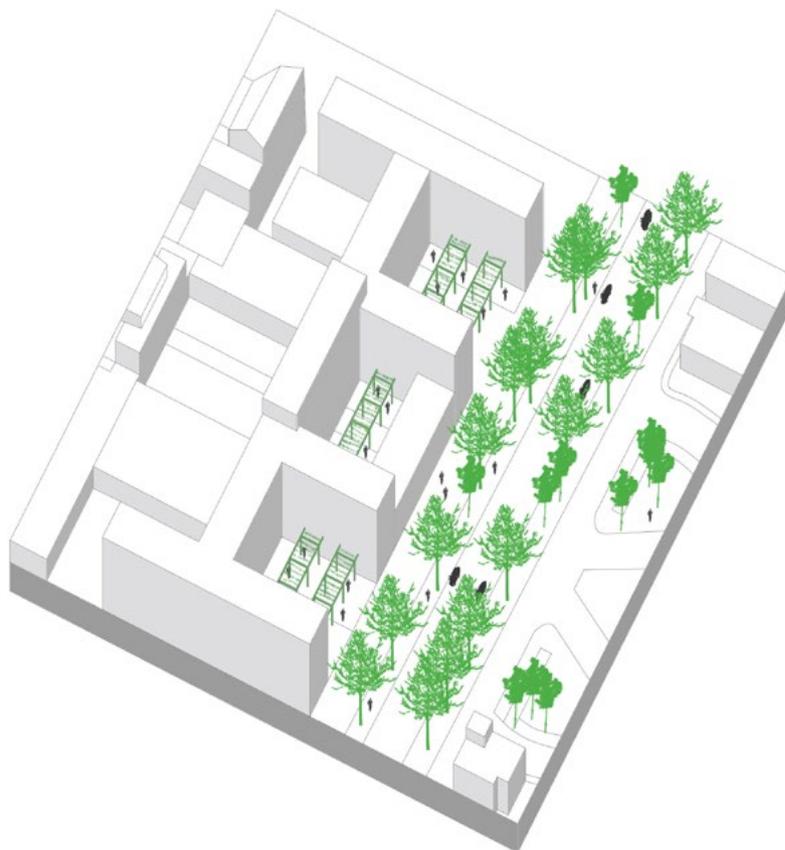


Figura 6.4.8 - Nbs Caso 4 - assonometria dell'intervento

Figura 6.4.9 - Immagine evocativa dell'intervento del caso 4



CONCLUSIONI

La simulazione microclimatica della sede centrale del Politecnico di Torino mediante l'utilizzo del software Envi-Met ha permesso di valutare le condizioni climatiche estive in termini di temperatura dell'aria e della superficie, nonché della PET, indice di stress termico percepito dall'uomo. In particolare, la ricerca ha voluto valutare l'efficacia degli interventi del masterplan di progetto sulla riduzione delle condizioni di discomfort termico percepito dagli utenti del campus.

Dalle simulazioni è emerso che, grazie agli interventi del masterplan, si è ottenuta una significativa riduzione delle temperature estive e dell'indice PET, favorendo una maggiore percezione di comfort termico da parte degli utenti della sede del Politecnico di Torino.

I risultati della ricerca hanno evidenziato che l'utilizzo di tecniche di vegetazione e di cambio della pavimentazione hanno giocato un ruolo determinante nella riduzione dei valori di questi parametri, mentre l'utilizzo di materiali con un basso albedo ha permesso di limitare l'accumulo di calore, riducendo la temperatura della superficie stessa.

In sintesi, la ricerca ha dimostrato che l'utilizzo di tecniche di progettazione orientate alla sostenibilità ambientale, unitamente all'utilizzo di software di simulazione climatica come Envi-Met, possono rappresentare un valido strumento per migliorare le condizioni di comfort termico degli spazi esterni, favorendo la riduzione dell'impatto ambientale degli edifici e migliorando la qualità della vita degli utenti.

In conclusione, la ricerca ha fornito importanti indicazioni per la progettazione di spazi esterni sostenibili e confortevoli, dimostrando che la combinazione di tecniche di progettazione e di simulazione climatica possa rappresentare una risposta efficace alle sfide poste dal cambiamento climatico e dalla necessità di garantire un utilizzo sostenibile degli spazi esterni. La simulazione del microclima è uno strumento utile per migliorare la progettazione architettonica perché consente di valutare come le caratteristiche del sito e del clima circostante possono influire sulle prestazioni energetiche e di comfort degli edifici.

Per ultimo sono state ideate delle viste suggestive su come si potrebbero appli-

care le nature based solution nella sede centrale del Politecnico nell'ottica della mitigazione delle isola di calore urbano.

Potranno inoltre essere considerate strategie di gestione del verde e valutare più specificamente e in modo più approfondito le strategie progettuali adottate discutendo i risultati delle simulazioni e le misure con utenti e stakeholder per evidenziare i benefici delle singole strategie progettuali e l'importanza dei comportamenti e degli interventi sostenibili. La fase di reporting dei progressi si potrebbe affinare definendo in modo più puntuale gli indicatori per le valutazioni degli interventi e delle politiche adottate.

Questo lavoro può essere la base per uno studio architettonico più approfondito, che può partire dalle condizioni microclimatiche ottenute con il masterplan e completare la parte di arredo urbano esterno al fine di rendere gli spazi esterni più confortevoli attuando le varie strategie di mitigazione e adattamento, come schermature solari, specchi d'acqua, vegetazione e colorazioni delle superfici con colori chiari e simulare nuovamente le condizioni di comfort esterno. Sebbene infatti vi siano stati dei miglioramenti di alcuni indicatori di comfort esterno i risultati ottenuti distano ancora da valori accettabili, specie in un contesto dove le estati diventano sempre più lunghe e torride. I risultati delle simulazioni potranno essere integrati e confrontati anche mediante campagne di monitoraggio e misura delle variabili del microclima nelle diverse aree del campus. Per ultimo il tema del particolato atmosferico può essere in parte ricondotto alle politiche per una mobilità sostenibile (ciclabile pedonale, uso del mezzo pubblico, incremento degli stalli per biciclette ecc.) e ai strumenti diretti di adattamento come schermature o filtri naturali.

BIBLIOGRAFIA

Arnetoli Maria Vittoria (2021) "Resilienza al cambiamento climatico e rigenerazione urbana." pp. 9-23. Dida, Dipartimento di Architettura Università degli Studi di Firenze.

Arnfield AJ (2003) "Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island." *International Journal of Climatology*.

Barioglio Caterina (2022) *Univercity. Il campus universitario come esperimento urbano*. pp. 45-110. LetteraVentidue Edizioni

Chen L., D., Liu, W., Gan, T., Liu, K. (2019), "A review of mitigating strategies to improve the thermal environment and thermal comfort in urban outdoor spaces, in: *Science of the Total Environment*, n. 661/2019, pp. 125-236, 331– 353, [Online] Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.062>

Chen L. and Ng E., 2012, "Outdoor thermal comfort and outdoor activities: A review of research in the past decade"

Colaninno N, Morello E (2019) Modelling the impact of green solutions upon the urban heat island phenomenon by means of satellite data. *Journal of Physics, conference Series* 1343:012010.

Crum SM, Shiflett SA, Jenerette GD (2017) The influence of vegetation, mesoclimate and meteorology on urban atmospheric microclimates across a coastal to desert climate gradient. *Journal of Environmental Management* 200:295–303.

European Environment Agency (2021) *Air quality in Europe — 2021 report*. EEA Report No 10/2021.

Erell, E., Pearlmutter, D., Williamson, T. (2011) *Urban microclimate, designing the spaces between buildings*, Earthscan, UK.

Taleghani, M., Kleerekoper, L., Tenpierik, M, & Dobbelsteen, A. van. den. (2015), "Outdoor thermal comfort within five different urban forms in the Netherlands". Building and Environment, volume 83, pp. 35-45 e 65-78

Pollo, R. and Trane, M. (2021), "Adaptation, Mitigation, and Smart Urban Metabolism toward the Ecological Transition", in book – "Possible and preferable scenarios of a Sustainable Future. Towards 2030 and beyond" pp.74-89.

Marchesi, S. Sajani, S., Lauriola, P. (2013) Isole di calore e misure di mitigazione. *Ecoscienza*, 5, pp. 72-73

UNFCCC (2012) Slow onset events

Wolfensohn J, Cherpitel D (2002) Why we need to do what we are doing

World Health Organization (2016) Global report on urban health: equitable, healthier cities for sustainable development

World Health Organization (2016) Ambient Air pollution: a global assesment of exposure and burden of disease

Wu Z, Zhang Y (2019) Water bodies' cooling effects on urban land daytime surface temperature: Ecosystem service reducing heat island effect, *Sustainability* (Switzerland) 11:1–11. doi: 10.3390/su11030787

ARC (2022) IARC: Outdoor air pollution a leading environmental cause of cancer deaths

Oke T. R., 1998, *Boundary layer climates*, Routledge; 2nd Edition.

Oke T.R., 2015, 'The distinction between canopy and boundary layer urban heat islands'

COST Action 730., 'An introduction to the Universal Thermal Climate Index'

Dessi V., 2008, *Progettare il comfort urbano*, 1st edition, Italy.

European Environment Agency (2021) "Climate-ADAPT strategy 2022-2024"

Fernando M. Reimers, (2022) " Education and Climate Change The Role of Universities" pp.137-150. Springer. Consultato online il 15/10/2022.

Buccolieri Riccardo, Gatto Elisa (2020) " Impact of Urban Vegetation on Outdoor Thermal Comfort: Comparison between a Mediterranean City (Lecce, Italy) and a Northern European City (Lahti, Finland)"

Mercogliano Paola (2020), "Cambiamento climatico", in "Adattarsi al clima che cambia, Innovare la conoscenza per il progetto ambientale" a cura di Losasso Mario, Lucarelli Maria Teresa, Rigillo Marina e Valente Renata, Maggioli Editore, Rimini, pp. 31-41.

Arnetoli Maria Vittoria (2020), "Onda di Calore", in "Adattarsi al clima che cambia, Innovare la conoscenza per il progetto ambientale" a cura di Losasso Mario, Lucarelli Maria Teresa, Rigillo Marina e Valente Renata, Maggioli Editore, Rimini, pp. 47-51.

Marusella Caterina Claudia, Mandaglio Mariateresa (2020), "Indicatori d'impatto" e "Mitigazione climatica", in "Adattarsi al clima che cambia, Innovare la conoscenza per il progetto ambientale" a cura di Losasso Mario, Lucarelli Maria Teresa, Rigillo Marina e Valente Renata, Maggioli Editore, Rimini, pp. 71-76 e 89-94.

D'ambrosio Valeria (2020), "Misurare l'adattamento climatico", in "Adattarsi al clima che cambia, Innovare la conoscenza per il progetto ambientale" a cura di Losasso Mario, Lucarelli Maria Teresa, Rigillo Marina e Valente Renata, Maggioli Editore, Rimini, pp. 172-255.

Battisti Alessandra, Laureti Flavia (2018), "Climate Mitigation and Adaptation Strategies for Roofs and Pavements: A Case Study at Sapienza University Campus" [online] Available at <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/10/3788>

O'Regan Bernadette, Horan William (2021), Developing a Practical Framework of Sustainability Indicators relevant to All Higher Education Institutions to Enable meaningful International Rankings" [online] Available at <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/2/629>

Taleghani, M., Kleerekoper, L., Tenpierik, M, & Dobbelsteen, A. van. den. (2015), "Outdoor thermal comfort within five different urban forms in the Netherlands". Building and Environment, volume 83, pp. 65-78, [Online] Available at: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.03.014> [Accessed 19 April 2021]

Taleghani, M., Tenpierik, M., Dobbelsteen, A. van. den. & Sailor, D. (2014), "Heat in courtyards. A validated and calibrated parametric study of heat mitigation strategies for urban courtyards in the Netherlands". *Solar energy*, volume 103, pp. 108–124, [Online] Available at: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.01.033>.

Nikolopoulou Marialena, Lykoudis Spyros (2005), " Thermal comfort in outdoor urban spaces: Analysis across different European countries", [Online] Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132305002039>.

Robinson Zoe, Catney Philip, Calver Philippa and Adam Peacock, "Universities as Living Labs for Climate Praxis", Chapter 12, pp. 129-139, [Online] Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-79739-3_12

Matteo Trane, Matteo Giovanardi, Anja Pejovic e Riccardo Pollo (2023), "Overview on urban climate and microclimate modeling tools and their role to achieve the Sustainable Development Goals"

Graham J. (2016), "Climates: Architecture and the Planetary Imaginary", pp. 9-14, [Online] Available at: <https://cdn.filepicker.io/api/file/ssgbYG78SeW8yVGnb203?&fit=max>

Adedeji, O. , Reuben O., Olatoye O., (2014), "Global Climate Change. *Journal of Geoscience and Environment Protection*", vol. 2, pp. 115-12, doi: 10.4236/gep.2014.22016, [Online] Available at: [https://www.scirp.org/\(S\(czeh2tfqw2orz553k1w0r45\)\)/journal/paperinformation.aspx?paperid=45024](https://www.scirp.org/(S(czeh2tfqw2orz553k1w0r45))/journal/paperinformation.aspx?paperid=45024)

Dunn R. J., Alexander H, Donat L. V., Bador M., Herold N., (2020), "Development of an updated global land in situ-based dataset of temperature and precipitation extremes", *Journal of Geophysical Research*, pp. 2-15, [Online] Available at: <https://doi.org/10.1029/2019JD032263> Received 16 DEC 20

UNECE, UN Organisation, 2020, "Measuring and Monitoring Progress Towards the Sustainable Development Goals", pp. 12-17 e 45-51, [Online] Available at: https://unece.org/sites/default/files/2021-04/2012761_E_web.pdf

Ma R., Wang T., Wang Y., Chen J, 2022, "Tuning urban microclimate: A morpho-patch approach for multi-scale building group energy simulation", pp. 3-8, [Online] Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103516>

- Graham A., Mitchell C., 2016, "The role of boundary organizations in climate change adaptation from the perspective of municipal practitioners", [Online] Available at: <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1799-6>
- Druckman J., McGrath M., 2019, "The evidence for motivated reasoning in climate change preference formation", pp. 111-119, [Online] Available at: <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0360-1>
- Adedeji O., Reuben O., Olatoy O., 2014, "Global Climate Change", [Online] Available at: <http://dx.doi.org/10.4236/gep.2014.22016>
- Brooks N., Adger W., 2023, "The Determinants of Vulnerability and Adaptive Capacity at the National Level and the Implications for Adaptation", pp. 152-162, [Online] Available at: <http://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2004.12.006>
- Lawrence D., MacDougall A., Marchenko S., Nicolisky D., 2018, "Dependence of the evolution of carbon dynamics in the northern permafrost region on the trajectory of climate change", [Online] Available at: <https://doi.org/10.1073/pnas.1719903115>
- Weiland S., Hickmann T., Lederer M., Marquardt J., Schwindenhammer S., 2021, "The 2030 Agenda for Sustainable Development: Transformative Change through the Sustainable Development Goals?", pp. 90-93, [Online] Available at: <https://doi.org/10.17645/pag.v9i1.4191>
- Chan S., Amling W., 2019, "Does orchestration in the Global Climate Action Agenda effectively prioritize and mobilize transnational climate adaptation action?" pp. 429-435, [Online] Available at: <https://doi.org/10.1007/s10784-019-09444-9>
- Fisher S., 2022, "Opening up New Geographical Ontologies around Adapting to Climate Change", [Online] Available at: <https://doi.org/10.1111/tesg.12552>
- Filho W., Sima M., Sharifi A., Luetz J., 2022, "Handling climate change education at universities: an overview", pp. 4-15, [Online] Available at: <https://doi.org/10.1186/s12302-021-00552-5>

SITOGRAFIA

ArchDaily, <https://www.archdaily.com/968590/rodda-lane-sibling-architecture>, consultato il 05.03.2022

ArchDaily, <https://www.archdaily.com/976229/pavilion-of-sciences-po-moreau-kusunoki>, consultato il 02.03.2023

ArchDaily, <https://www.archdaily.com/983038/la-playita-garden-joshua-ascencio>, consultato il 02.03.2023

Arpa Piemonte, <http://www.arpa.piemonte.it/dati-ambientali/dati-meteoidrografici-giornalieri-richiesta-automatica>, consultato il 10.12.2022

Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici, <https://www.cmcc.it/it/report-torino>, consultato il 14.04.2023

Città di Torino, <http://www.comune.torino.it/verdepubblico/alberi/#:~:text=La%20Citt%C3%A0%20di%20Torino%20sta,autunno%2Dinverno%202020%2D2021>, consultato nei mesi di Ottobre e Novembre 2022

Città di Torino, il Piano Strategico dell'Infrastruttura Verde Torinese, http://www.comune.torino.it/consiglio/documenti1/atti/allegati/202002957_1tc.pdf, pagg. 14-18 e 82-86, consultato il 10.01.2023

Città Metropolitana di Torino, <http://www.cittametropolitana.torino.it/cms/ambiente/qualita-aria/dati-qualita-aria/ipqa>, consultato il 14.03.2022

Città Metropolitana di Torino, <http://www.cittametropolitana.torino.it/cms/ambiente/qualita-aria/rete-monitoraggio/stazioni-monitoraggio>, consultato il 23.01.2023

DIVISARE, <https://divisare.com/projects/415322-cobe-rasmus-hjortshoj-coast-karen-blixens-plads>, consultato il 15.05.2023

ENVI-Met, <https://www.envi-met.com/it/formazione-assistenza/>, consultato nel mese di Febbraio 2023

European Commission, <https://education.ec.europa.eu/sites/default/files/2022-01/communication-european-strategy-for-universities-graphic-version.pdf>, consultato il 15.04.2023

European Commission, <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC129381>, consultato il 17.04.2023

European Environment Agency, <https://www.eea.europa.eu/en/topics/in-depth/climate-change-mitigation-reducing-emissions>, consultato il 10.11.2022

Felixx, <https://www.felixx.nl/projects/nbs-catalogue.html>, consultato nel mese di Giugno 2023

Geoportale, <http://geoportale.comune.torino.it/web/cartografia/cartografia-scarico>, consultato nel mese di Settembre 2022

Geoportale, <http://geoportale.comune.torino.it/web/governo-del-territorio/piano-regolatore-generale/tavole-di-piano>, consultato il 15.09.2022

Google Maps, <https://www.google.it/maps/>, consultato più volte nei mesi tra Ottobre 2022 e Marzo 2023

GreenTeam PoliTO, <https://www.polito.it/ateneo/campus-sostenibile>, consultato a Maggio 2023

ISPRA, <https://www.geologiapiemonte.it/collegamenti/servizio-geologico-italia>, consultato il 25.01.2023

MuseoTorino, <https://www.museotorino.it/view/s/3a3ad0df47564f14bd936feb8a8cbe4d>, consultato il 25.01.2023

MuseoTorino, <https://www.museotorino.it/view/s/5b192c7716be4cd4adefb73d59e4c524>, consultato il 25.01.2023

MuseoTorino, <https://www.museotorino.it/view/s/bc02cc1e68104a998bc92e966e788891>, consultato il 03.02.2023

NASA, <https://climate.nasa.gov/solutions/adaptation-mitigation/>, consultato il 13.11.2022

Piano di Resilienza della Città di Torino, http://www.comune.torino.it/ambiente/cambiamenti_climatici/

Politecnico di Milano, <https://www.polimi.it/articoli/renzo-piano-presenta-il-masterplan-bovisa-goccia>, consultato il 03.03.2023

Politecnico di Torino, <https://www.masterplan.polito.it/>, consultato il 13.03.2023

Politecnico di Torino, https://www.masterplan.polito.it/progettualita/i_rapporti_tra_i_campus_e_il_territorio, consultato il 13 Marzo 2023

Sasaki Architecture, <https://www.sasaki.com/projects/sciences-po-artillerie-campus-paris/>, consultato il 03.03.2023

THE Impact Ranking, <https://www.timeshighereducation.com/impactrankings>, consultato a Febbraio 2023

UI GreenMetric, <https://greenmetric.ui.ac.id/rankings/overall-rankings-2022>, consultato il 01.03.2023

United Nations, <https://unstats.un.org/sdgs/>, consultato in 22.03.2023

Università La Sapienza Roma, https://iris.uniroma1.it/retrieve/58753f69-e0e4-471b-ab7a-35e4b83f00dd/DelSerrone_Evaluation-of-microclimate_2022.pdf, consultato il 15.04.2023

VITO Neatherlans, <https://vito.be/nl/product/urbclim-stedelijke-klimaatmodellering>, consultato il 25.11.2022.

A mamma, papà, Marzia e Bacco

