4.
Simulazione con software fluidodinamico ENVI-met

4.1 ENVI-met

ENVI-met è un modello microclimatico tridimensionale, non idrostatico, in grado di simulare le interazioni superficie-pianta-aria in ambiente urbano, con una risoluzione spaziale di 0.5 m-10 m e una risoluzione temporale di dieci secondi: il suo funzionamento è basato sulle leggi fondamentali della dinamica dei fluidi e della termodinamica.

ENVI-met è particolarmente utile nella valutazione di impatto di nuovi interventi di urban-design, in quanto è in grado di simulare

- il flusso del vento attorno e tra gli edifici
- i processi di scambio di calore e vapore a livello del terreno e alle pareti
- la turbolenza atmosferica
- alcuni parametri della vegetazione
- la bioclimatologia

fornendo così previsioni utili e numeriche sull'impatto ambientale di nuove strutture o aree verdi.

Il software, nella elaborazione dei dati, risolve le equazioni della fluidodinamica di Navier-Stokes e della termodinamica.

La **fluidodinamica** è quella parte della fisica che studia il comportamento dei fluidi (ovvero liquidi e gas) in movimento.

Le leggi fondamentali della fluidodinamica sono le equazioni del bilancio (anche dette leggi di conservazione) e, in particolare:

- l'equazione di continuità (o conservazione della massa)
- la legge di conservazione della quantità di moto (anche nota come seconda legge di Newton)
- la legge di conservazione dell'energia.

Queste leggi sono basate sulla meccanica classica e vengono modificate nella meccanica relativistica.

Le equazioni del bilancio per la fluidodinamica vengono dette equazioni di Navier-Stokes , e sono equazioni differenziali alle derivate parziali non lineari.

Le equazioni di Navier-Stokes nella loro forma non semplificata non hanno una soluzione generale in forma chiusa, e vengono risolte in tal modo solo con la metodologia della fluidodinamica computazionale (abbreviata in CFD) ovvero tramite metodi numerici al calcolatore.

A seconda del problema fisico possono essere semplificate in diversi modi. In alcuni casi ciò permette di ottenere una soluzione analitica in forma chiusa.

La **termodinamica** è quella parte di fisica che s occupa delle relazioni che intercorrono tra scambi di energia nelle sue varie forme (principalmente calore e lavoro) e le proprietà fisiche di corpi e sistemi. E' basata su quattro principi (tre base e il principio 'zero' che definisce la temperatura ed è implicito negli altri tre) che regolano le trasformazioni termodinamiche, il loro procedere e i loro limiti.

Parametri calcolati dal software:

- atmosfera - vento, temperatura, vapore, turbolenza, inquinamento;
- terreno - temperatura, flusso di acqua, concentrazioni di acqua;
- vegetazione - temperatura delle foglie, scambio di calore, scambio di vapore, trasporto di acqua, intercettazione dell'acqua;
- superfici - flussi a livello del terreno, flussi alle pareti e al tetto, trasferimento di calore attraverso le pareti
- biometeorologia - valore del PMV.

I parametri analizzati nelle simulazioni del progetto sono:

- **temperatura potenziale**: la temperatura potenziale di una particella di fluido in condizioni di pressione p è la temperatura che quella particella avrebbe se fosse portata, tramite uno spostamento adiabatico, ad una pressione standard di riferimento p_0, in genere 1000 millibar. La temperatura potenziale è, dal punto di vista dinamico, una grandezza molto più importante di quella reale. Questo perché non risente degli spostamenti verticali associati al moto del fluido in zone caratterizzate da turbolenza o attorno ad ostacoli. Una particella d'aria che si muove sopra una piccola montagna si espande e raffredda durante la fase di risalita, mentre si riscalda e comprime durante la discesa, ma la temperatura potenziale non

cambia se non intervengono altri fattori quali il riscaldamento/raffreddamento dovuto a fattori esterni o l'evaporazione/condensazione. Un processo che esclude questi effetti si definisce adiabatico secco.

- **temperatura media radiante**: la *Tmr* è definita come la temperatura di un ambiente fittizio, caratterizzato da pareti aventi tutte la stessa temperatura superficiale, nel quale un oggetto scambierebbe lo stesso flusso *radiativo* che scambia nell'ambiente reale (dove, cioè, ogni parete ha una temperatura sua propria).
  Questa grandezza serve dunque a caratterizzare, dal punto di vista radiativo, un locale con asimmetrie termiche, per mezzo di un solo valore della temperatura.

- **predicted mean vote** (Fanger): il PMV rappresenta il valore medio del voto attribuito a una determinata situazione ambientale da un campione di persone, in definite condizioni di attività e vestiario.
  Il PMV si basa sul presupposto, tratto da studi sperimentali, che la condizione di benessere termico per la maggior parte degli individui si ottenga quando il bilancio termico è in equilibrio e la temperatura cutanea media ed il calore dissipato per evaporazione del sudore variano entro limiti ben ristretti corrispondenti, di fatto, ad una sollecitazione moderata del sistema di termoregolazione. Al di fuori del benessere termico, la sensazione di caldo o di freddo è proporzionale al carico termico (potenza termica generata all'interno del corpo umano meno potenza termica dispersa in condizioni di benessere) . Il carico termico si è dimostrato correlabile, in vaste popolazioni, con un voto che può essere espresso dai soggetti su una scala di sensazione termica:

VOTO	SENSAZIONE TERMICA SOGGETTIVA
-3	molto freddo
-2	freddo
-1	leggermente freddo
0	neutralità-benessere
+1	leggermente caldo
+2	caldo
+3	molto caldo

Sulla base di dati sperimentali è stata elaborata una correlazione tra l'indice PMV e la percentuale di insoddisfatti PPD **Predicted Percentage of Dissatisfied**. Anche per un PMV=0, risulta PPD=5%, cioè non esistono

condizioni ambientali che possono soddisfare il 100% delle persone. Il massimo ottenibile su base statistica è quindi il soddisfacimento del 95% delle persone. Molte norme tecniche considerano condizioni ambientali accettabili per il benessere quelle che siano ritenute tali da almeno l'80% degli individui. Di conseguenza risulta: $-0.5 \leq PMV \leq +0.5$.

4.2 Scopo e finalità delle simulazioni

Nonostante sia un dato di fatto che la vegetazione porti grandi benefici sotto vari punti di vista alla città e ai suoi utenti, è sempre più necessario **quantificare numericamente** ciò che finora è stato definito su basi emozionali e sensoriali. Questa esigenza nasce anche dal fatto che spesso, negli ultimi tempi, scelte sbagliate hanno portato alla presenza di consociazioni vegetali (in ambito urbano) particolarmente costose da gestire e tutto sommato anche poco utili dal punto di vista ambientale. E' quindi auspicabile provare con opportune simulazioni l'efficacia della vegetazione, non tralasciando fondamentali aspetti progettuali ed esecutivi quali la scelta delle piante giuste e l'applicazione delle giuste tecniche agronomiche in fase di impianto e coltivazione. Per comprendere al meglio i dati ottenuti dalla simulazione, è necessario ricordare che **le piante sono esseri viventi e il risultato della loro presenza è strettamente legato all'evoluzione nel tempo dell'organismo nel suo complesso**: un insieme di alberi che crescono sani e rigogliosi produrrà l'effetto desiderato - una consociazione stentata offrirà limitati benefici microclimatici ed estetici. E' inoltre necessario sottolineare che il **risultato della simulazione non tiene conto dell'energia spesa per ottenerlo**, ma immagina uno scenario in cui le piante crescono senza l'aiuto dell'uomo. Per questa ragione diviene ancora più importante la corretta e sostenibile impostazione dell'intervento di messa a dimora delle piante, affinché sia ridotto al minimo il costo energetico dell'intervento.

Obiettivo della simulazione è dimostrare che con una corretta progettazione del verde all'interno di un contesto urbano, tenendo conto anche dell'area geografica e delle condizioni climatiche, si può ottenere:

- una effettiva **riduzione di temperatura in estate** rendendo più fruibili gli spazi all'aperto;
- una **maggiore protezione degli edifici** dalla radiazione diretta del sole evitando un eccessivo riscaldamento degli interni;
- un **miglioramento del comfort** anche nella stagione invernale.

In estate la presenza di latifoglie decidue in spazi aperti e vicino agli edifici contribuisce ad abbassare la temperatura radiante degli stessi, accrescendo il

benessere degli utenti e limitando l'utilizzo dei condizionatori. Per contro, la perdita delle foglie nel periodo invernale consente il passaggio della radiazione solare e il riscaldamento naturale degli edifici. Per lo stesso principio, la messa a dimora di caducifoglie nei parcheggi a raso contribuisce all'abbassamento della temperatura media radiante del suolo in estate (le chiome ombreggiano e proteggono anche le auto dal calore solare), mentre in inverno l'assenza di vegetazione non abbassa la temperatura. Lungo le strade i filari di alberi sempreverdi, oltre a funzionare da barriera acustica e visiva, trattengono e deviano le polveri inquinanti.

4.3 Dati di *input*

I dati di *input* necessari per il corretto funzionamento del software sono relativi alla descrizione dettagliata del suolo, degli edifici, della vegetazione e delle condizioni atmosferiche iniziali (velocità e direzione del vento a 10 m, lunghezza di rugosità superficiale, temperatura dell'aria, umidità specifica a 2500 m e umidità relativa a 2 m).

Ogni simulazione microclimatica di un'area richiede la definizione di due *file* di *input*:

- ***file* di configurazione** con inserimento di dati scritti, dove vengono stabiliti i *setting* del modello (data, tempo di simulazione, intervallo di salvataggio degli output, opzioni per il modello di turbolenza, proprietà degli edifici, *setting* per il modello della vegetazione, *setting* per il modello del suolo, *setting* per il calcolo degli indici bioclimatici,...);

- ***file* grafico** con disegno dell'area considerata grazie all'apposita interfaccia del modello, Envi-met Eddi. In questo foglio di lavoro viene definita l'area di studio per quanto riguarda le sue dimensioni, la posizione geografica, gli edifici presenti e la presenza e il tipo di vegetazione, abilitando la finestra *"edit building/vegetation"*; abilitando la finestra *"edit soils"* si definiscono le caratteristiche del suolo. Per agevolare la sistemazione corretta di edifici e vegetazione è possibile importare una immagine di sfondo in formato *.bmp.

PREPARAZIONE DEI *FILES* DI *INPUT*

Una volta definito il *file* di Autocad di progetto, se ne fa una stampa su *file* e la si importa in Photoshop sovrapponendo la planimetria all'ortofoto dell'area in modo tale da avere il giusto collocamento del progetto nel contesto. Il lavoro viene salvato in formato *.bmp.

Tramite l'interfaccia **Envi-met Eddi** si imposta l'area in un nuovo *file* definendo:

- la **dimensione della griglia** (in base alla grandezza dell'area) e la consecutiva dimensione delle celle in cui è divisa. Essendo l'area in oggetto abbastanza estesa la misura scelta per le celle è di 5x5 m in modo da rientrare nelle dimensioni massime ammesse dal software per il calcolo;
- il nome della località e sua **latitudine e longitudine** ed eventuale rotazione del modello rispetto al nord.

(Figura 4.1)

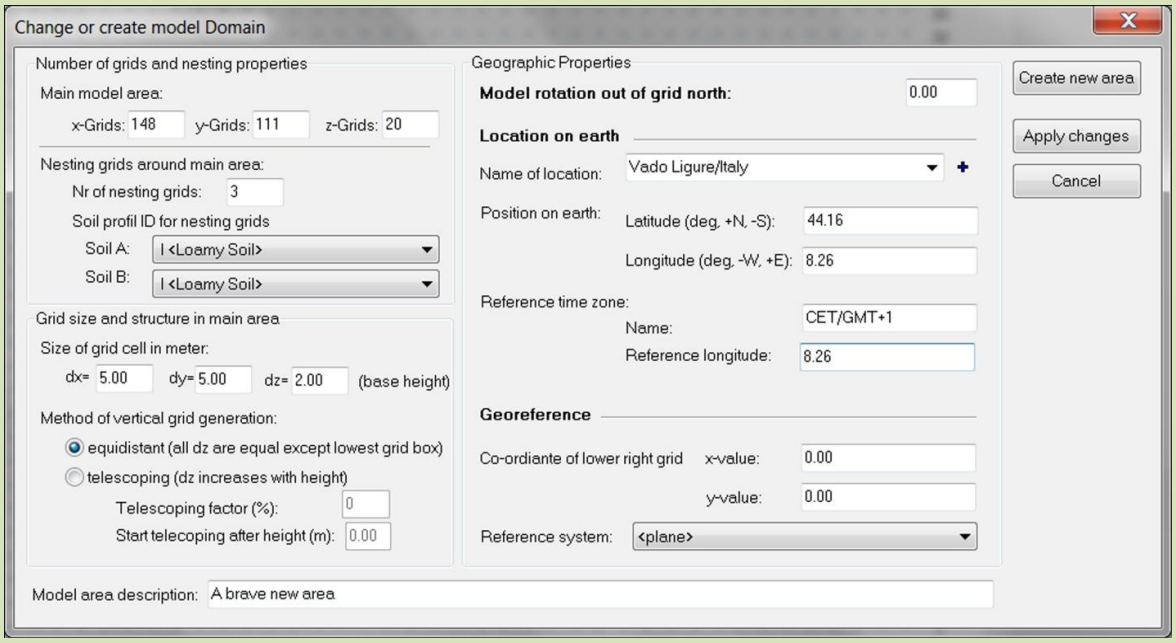


Figura 4.1 Finestra di impostazione di un nuovo *file*

Successivamente si inserisce nella griglia l'immagine creata precedentemente in Photoshop, che si scalerà e si adatterà automaticamente alle dimensioni della griglia stessa (la griglia deve quindi avere le stesse dimensioni dell'immagine in metri calcolate in Autocad, diviso la dimensione scelta per le singole celle. Nella fattispecie le dimensioni reali dell'area sono 550x740 m - tradotte sulla griglia 550/5x740/5 -> n. 110x148 celle da 5x5 m cadauna). (Figura 4.2)

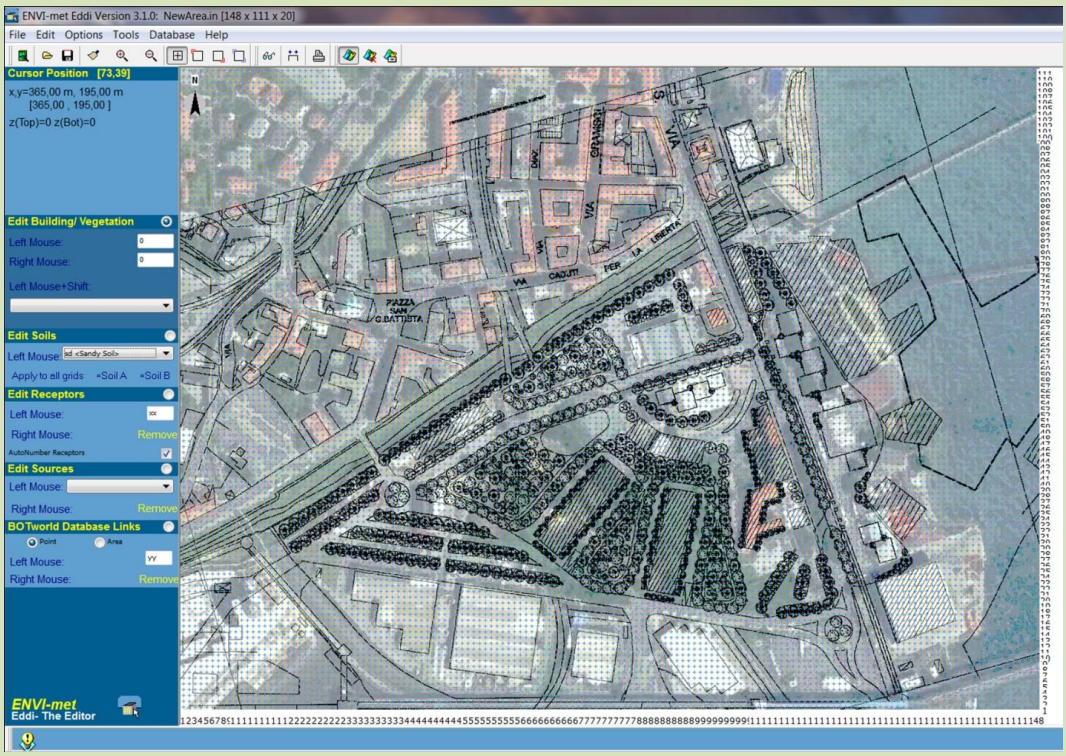


Figura 4.2 Finestra di ENVI-met Eddi: inserimento del file in formato *.bmp di guida per la definizione dell'area.

A questo punto si disegnano gli edifici e la vegetazione, seguendo la traccia della planimetria sottostante e attivando la finestra *"edit building/vegetation".* Visto che la dimensione delle celle è di 5x5 m la definizione di piante ed edifici può risultare approssimativa ma ciò non è rilevante dal punto di vista del calcolo e dei risultati. (Figura 4.3)

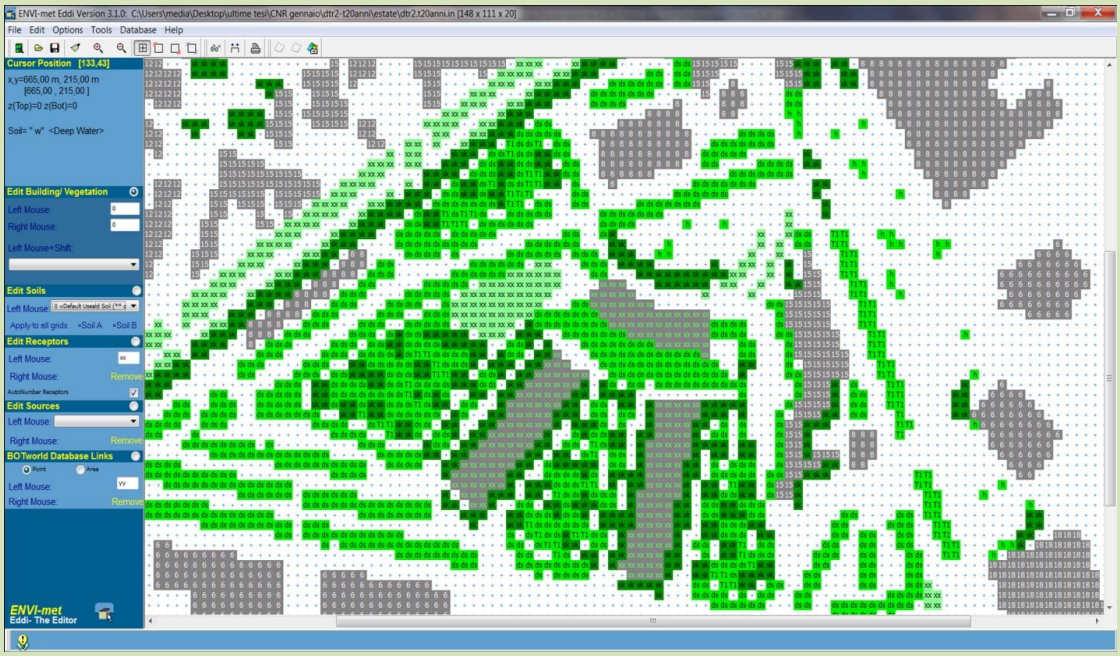


Figura 4.3 Finestra di ENVI-met Eddi: definizione di edifici ed aree verdi.

DEFINIZIONE EDIFICI - gli edifici sono disegnati in pianta assegnando a ciascuno la relativa altezza.

DEFINIZIONE VEGETAZIONE - è identificata sempre da celle che corrispondono a caratteristiche specifiche. Le piante possono essere scelte in base ad alcuni parametri quali:

- altezza (10m-15m-20m)
- densità della chioma (molto densa, medio densa, densa)
- divisione o meno della chioma in palchi
- presenza di tronco libero o rivestito da rami
- arbusti tipo siepe
- erba e alcuni tipi di colture agricole.

E' inoltre possibile scegliere di mettere qualsiasi tipo di vegetazione sul tetto degli edifici simulando così anche il beneficio del tetto verde. (Figura 4.4)

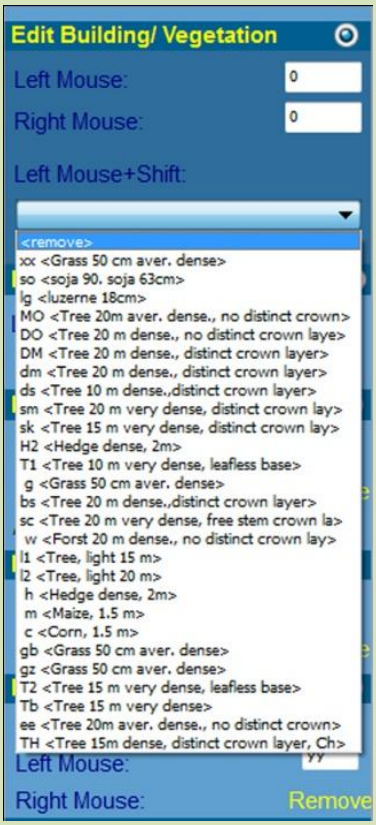


Figura 4.4 Selezione delle specie vegetali da inserire nell'area di progetto.

Dalla definizione di piante ed edifici si passa poi a quella del suolo attivando la finestra *"edit soils"* nella quale si può scegliere tra diversi tipi di terreno, pavimentazioni e acqua. (Figura 4.5)

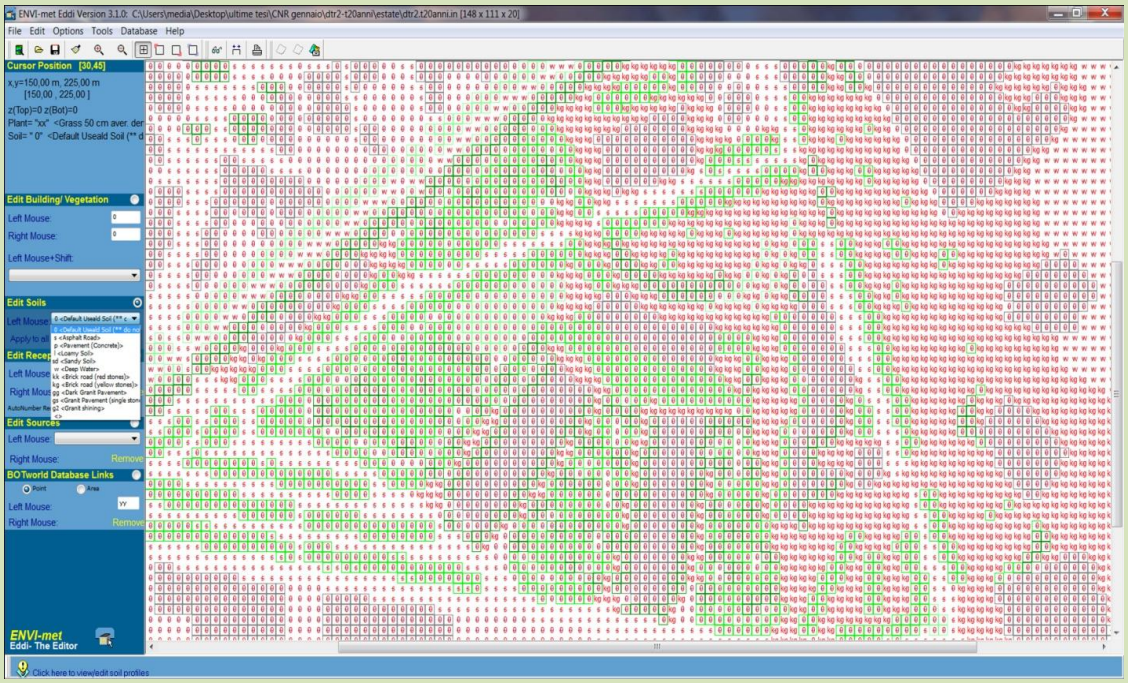


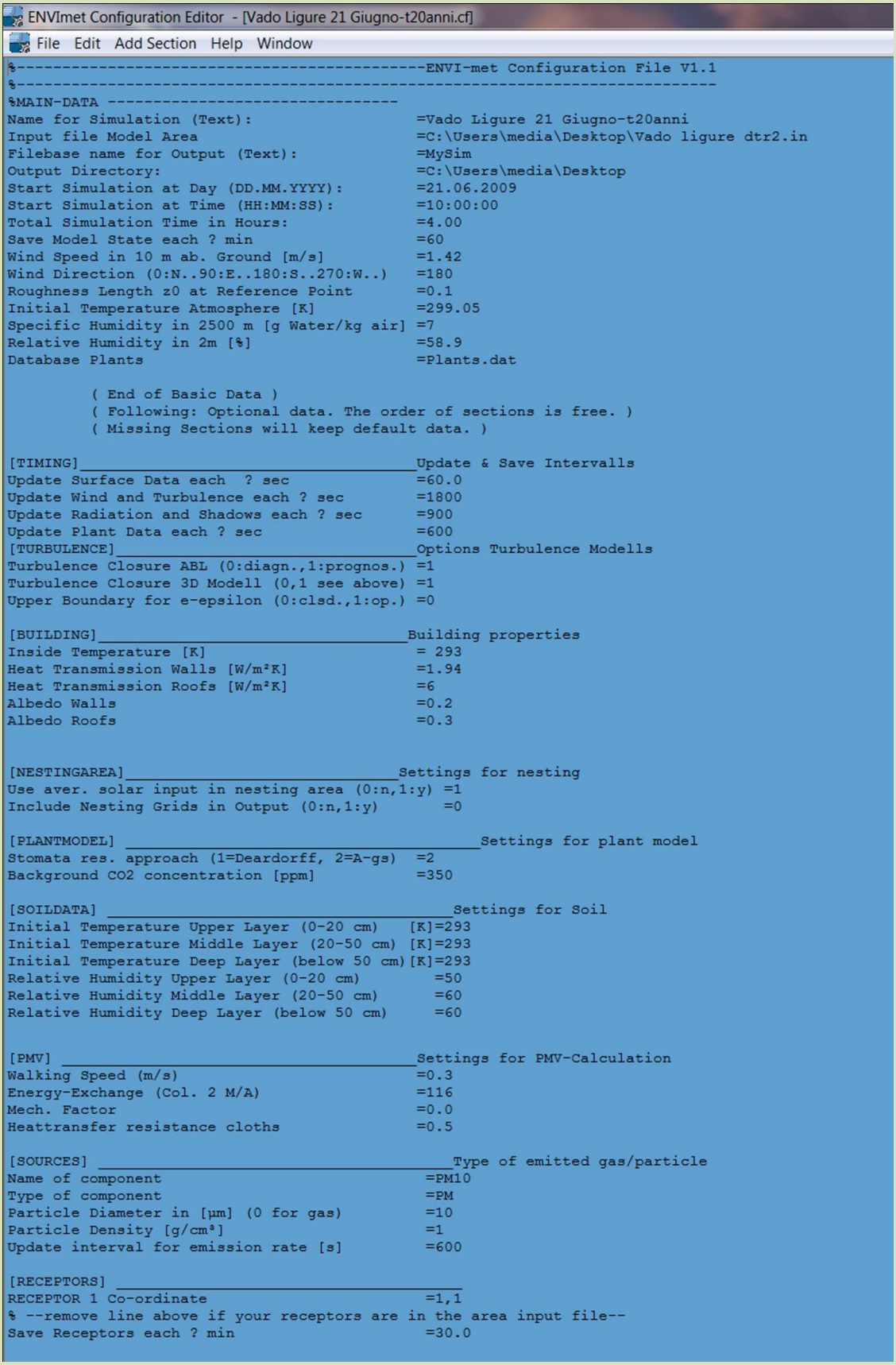
Figura 4.5 Finestra per la definizione dll'uso del suolo

A questo punto l'inserimento grafico dell'area è pronto per avviare la simulazione. Resta da definire il ***file* di configurazione** tramite l'interfaccia **Envi-met *configuration editor***.

In questo *file* vengono immessi:

- giorno e ora di inizio simulazione;
- numero di ore di simulazione e intervallo di salvataggio dei *file*;
- dati meteorologici (velocità e direzione del vento, temperatura iniziale, umidità specifica e relativa);
- rugosità di riferimento (per il calcolo eventuale della turbolenza);
- proprietà di trasmissione del calore degli edifici ed albedo delle superfici;
- *settings* delle piante;
- *settings* del suolo;
- *settings* per il calcolo del PMV.

(Figura 4.6)



```
ENVImet Configuration Editor  - [Vado Ligure 21 Giugno-t20anni.cf]
File  Edit  Add Section  Help  Window
%-------------------------------------------ENVI-met Configuration File V1.1
%-------------------------------------------------------------------------
%MAIN-DATA ---------------------------------
Name for Simulation (Text):                  =Vado Ligure 21 Giugno-t20anni
Input file Model Area                        =C:\Users\media\Desktop\Vado ligure dtr2.in
Filebase name for Output (Text):             =MySim
Output Directory:                            =C:\Users\media\Desktop
Start Simulation at Day (DD.MM.YYYY):        =21.06.2009
Start Simulation at Time (HH:MM:SS):         =10:00:00
Total Simulation Time in Hours:              =4.00
Save Model State each ? min                  =60
Wind Speed in 10 m ab. Ground [m/s]          =1.42
Wind Direction (0:N..90:E..180:S..270:W..)   =180
Roughness Length z0 at Reference Point       =0.1
Initial Temperature Atmosphere [K]           =299.05
Specific Humidity in 2500 m [g Water/kg air] =7
Relative Humidity in 2m [%]                  =58.9
Database Plants                              =Plants.dat

         ( End of Basic Data )
         ( Following: Optional data. The order of sections is free. )
         ( Missing Sections will keep default data. )

[TIMING]_____________________________________Update & Save Intervalls
Update Surface Data each  ? sec              =60.0
Update Wind and Turbulence each ? sec        =1800
Update Radiation and Shadows each ? sec      =900
Update Plant Data each ? sec                 =600
[TURBULENCE]_________________________________Options Turbulence Modells
Turbulence Closure ABL (0:diagn.,1:prognos.) =1
Turbulence Closure 3D Modell (0,1 see above) =1
Upper Boundary for e-epsilon (0:clsd.,1:op.) =0

[BUILDING]___________________________________Building properties
Inside Temperature [K]                       = 293
Heat Transmission Walls [W/m²K]              =1.94
Heat Transmission Roofs [W/m²K]              =6
Albedo Walls                                 =0.2
Albedo Roofs                                 =0.3


[NESTINGAREA]_______________________________Settings for nesting
Use aver. solar input in nesting area (0:n,1:y) =1
Include Nesting Grids in Output (0:n,1:y)       =0

[PLANTMODEL] _____________________________________Settings for plant model
Stomata res. approach (1=Deardorff, 2=A-gs)  =2
Background CO2 concentration [ppm]           =350

[SOILDATA] _____________________________________Settings for Soil
Initial Temperature Upper Layer (0-20 cm)    [K]=293
Initial Temperature Middle Layer (20-50 cm)  [K]=293
Initial Temperature Deep Layer (below 50 cm)[K]=293
Relative Humidity Upper Layer (0-20 cm)        =50
Relative Humidity Middle Layer (20-50 cm)      =60
Relative Humidity Deep Layer (below 50 cm)     =60


[PMV] _____________________________________Settings for PMV-Calculation
Walking Speed (m/s)                          =0.3
Energy-Exchange (Col. 2 M/A)                 =116
Mech. Factor                                 =0.0
Heattransfer resistance cloths               =0.5

[SOURCES] _____________________________________Type of emitted gas/particle
Name of component                             =PM10
Type of component                             =PM
Particle Diameter in [µm] (0 for gas)         =10
Particle Density [g/cm³]                      =1
Update interval for emission rate [s]         =600

[RECEPTORS] _____________________________________
RECEPTOR 1 Co-ordinate                        =1,1
% --remove line above if your receptors are in the area input file--
Save Receptors each ? min                     =30.0
```

Figura 4.6 File di configurazione *.cf contenente i setting del modello

Dopo aver compilato questo *file* si comincia la simulazione caricandolo insieme a quello di definizione dell'area su **Envi-met Start** e attivando il comando *"run model"*. I risultati saranno memorizzati in diversi *files* (tanti quanti gli intervalli di salvataggio nel corso delle ore di simulazione impostati) riguardanti diversi temi come atmosfera, suolo, superfici. Questi *files* sono decifrabili inserendoli in Leonardo, un'ulteriore interfaccia di Envi-met. (Figura 4.7)

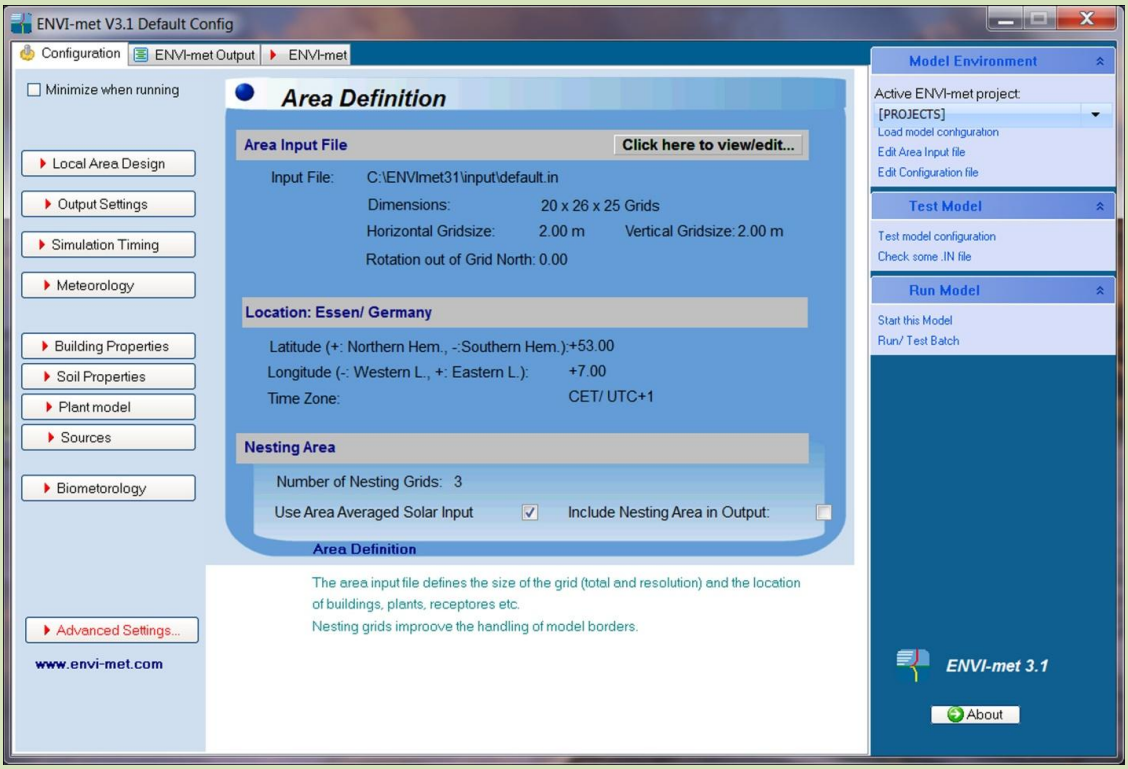


Figura 4.7 Interfaccia grafica per la verifica della configurazione e per la simulazione di ENVI-met.

Poiché gran parte del progetto è costituta da vegetazione, per sua natura elemento vivo e in continua evoluzione, si è scelto di analizzare diversi modelli di simulazione da confrontare anche per verificare la continuità dei benefici. L'analisi dell'area allo stato attuale è servita per verificare e quantificare il cambiamento delle condizioni conseguenti all'inserimento del parco.

- periodo estivo - stato attuale dell'area di intervento
- periodo invernale - stato attuale dell'area di intervento
- periodo estivo - stato intermedio di crescita delle piante
- periodo invernale - stato intermedio di crescita delle piante
- periodo estivo - piante a *climax*
- periodo invernale - piante a *climax*

SELEZIONE DEI DATI CLIMATICI DI *INPUT*

Per periodo estivo si intendono i mesi di giugno, luglio e agosto. Dicembre, gennaio e febbraio costituiscono il periodo invernale. Nelle simulazioni si sono indicati i giorni campione del 21 giugno (solstizio d'estate) e del 21 dicembre (solstizio d'inverno) in quanto i dati assegnati a queste due giornate sono considerati rappresentativi per i relativi periodi. Per quanto riguarda la temperatura di inizio della simulazione, è stata fatta la media matematica di tutte le temperature alle ore 10:00 (ora scelta per l'inizio della simulazione) di tutti i giorni del trimestre. Anche l'umidità relativa è quella media del trimestre preso in considerazione. La direzione del vento è quella più frequente nei tre mesi mentre la velocità è stata impostata in modo tale da avere una leggera brezza nel trimestre estivo e un vento debole nel periodo invernale: di fatto, calcolando la media della velocità reale dei venti, il dato è troppo basso e ininfluente quindi si è preferito, per motivi prudenziali, impostare il livello minimo.

I dati utilizzati sono:

- temperatura iniziale ore 10:00 21 giugno: 26°C
- umidità relativa ore 10:00 21 giugno: 58.9%
- velocità e direzione del vento ore 10:00 21 giugno: 1.42 m/s Sud
- temperatura iniziale ore 10:00 21 dicembre: 8.5°C
- umidità relativa ore 10:00 21 dicembre: 54.3%
- velocità e direzione del vento ore 10:00 21 dicembre: 2.5 m/s Nord-Ovest

I dati climatici sono stati forniti dalla stazione meteorologica di Vado Ligure (IK1AMC Weather Station, Vado Ligure, SAVONA www.vadoliguremeteo.it).

4.4 *Files* di *output*

L'elaborazione dei dati immessi precedentemente con i *file*s di *input* dà come *output* dei *files* decifrabili con l'interfaccia di **Envi-met Leonardo**. Questi sono divisi in diversi temi quali i dati atmosferici, del suolo, delle superfici, ecc. I *files* tematici sono tanti quanti gli intervalli di salvataggio durante le ore di simulazione: dalle 10:00 alle 14:00 un salvataggio ogni 60 minuti. I *files* di *output* risultano quindi cinque per ogni tema. Caricando su Leonardo gli *output* atmosferici si ha una visione della temperatura potenziale, della temperatura media radiante, del PMV, della velocità e direzione del vento, dello *sky-view-factor*, dell'umidità relativa e specifica. Caricando quelli relativi alle superfici si visualizzano invece i flussi di

calore latente e sensibile, le temperature, la radiazione diretta e diffusa, l'albedo delle superfici. (Figura 4.8)

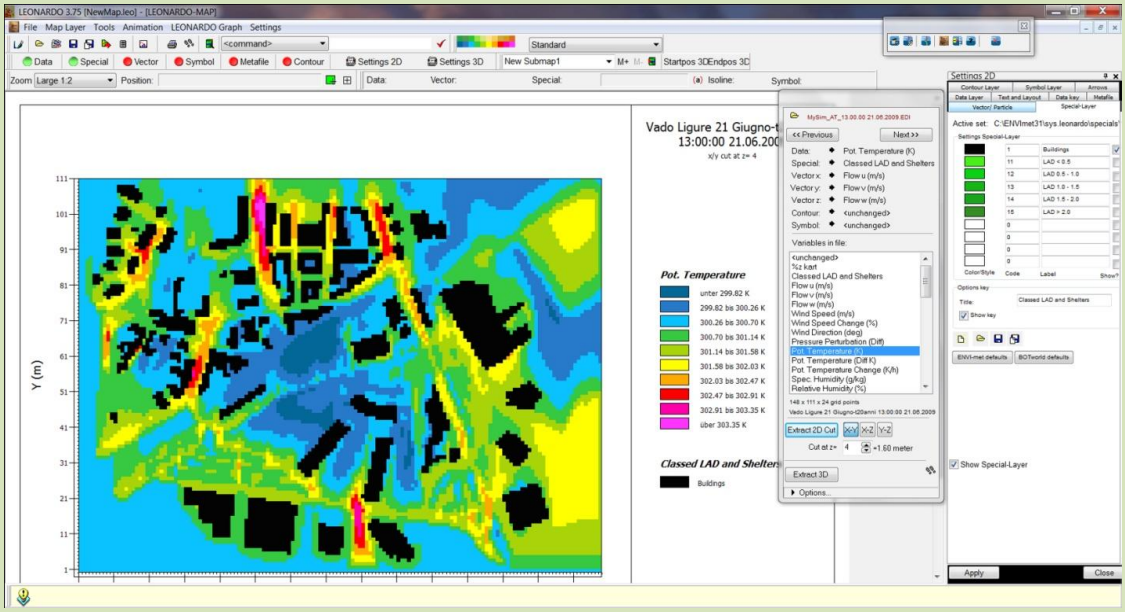


Figura 4.8 Finestra di Leonardo per la visualizzazione dei *files* di *output*.

I risultati sono visualizzabili in diversi modi:

- mappa colorata in cui ogni cella ha un colore che definisce la sua specifica condizione, descritta in dettaglio in un'apposita legenda a lato (di temperatura, umidità relativa, PMV, ecc...);
- isolinee, sulle quali insistono le medesime caratteristiche - possono essere in bianco e nero con indicazione scritta dei valori o colorate in modo differente (e in questo caso una legenda spiega i valori dei diversi colori);
- mappa con vettori, ognuno dei quali definisce la direzione e intensità dei venti.

Oltre che in pianta, gli stessi risultati sono visibili in sezione e in 3D.

Per quanto riguarda gli *output* di progetto si è scelto di analizzare principalmente tre parametri ritenuti più significativi al fine della dimostrazione della tesi.

Per ogni file di *input* (area attuale, stato intermedio di crescita delle piante, climax) si sono analizzati la temperatura potenziale a 1.60 mt. di altezza (altezza media considerata per una persona), la temperatura media radiante a livello del suolo, il PMV a 1.60 mt. di altezza. Questo sia per la stagione estiva sia per quella invernale alle ore 13:00. Per la stagione estiva si sono analizzati anche i parametri di temperatura potenziale, temperatura media radiante, PMV per la notte.

ANALISI DEI *FILES* DI *OUTPUT*

Caso estivo ore 13:00 - Dai risultati ottenuti si è notato che con l'inserimento del parco si ha un grande beneficio sia in termini di variazione di temperatura oggettiva sia in termini di benessere per l'utente. In particolare tra l'area nell'assetto attuale e l'area con l'inserimento del parco la temperatura potenziale in alcuni punti varia fino a 4°C, la temperatura media radiante varia fino a 40°C, e il PMV varia di tre punti raggiungendo una sensazione quasi di benessere.
Il raggiungimento di un beneficio è quindi evidente e numericamente dimostrato.
(Allegati da 4.1 a 4.12 e allegato 4.31)

1. Analisi dei files di output - Temperatura Potenziale

- *Area attuale*: dall'analisi del file di *output* si nota che la temperatura nell'intorno del dominio considerato è più alta rispetto a quella al centro, corrispondente con la zona a prato, e raggiunge i 30°C. Si evince quindi che l'area verde è insufficiente al fine di influenzare la temperatura circostante.

- *Stadio intermedio*: con l'inserimento del parco, già con le piante ad uno stadio intermedio di crescita, si ha un notevole abbassamento di temperatura non solo in corrispondenza della vegetazione ma, grazie all'azione del vento, anche nelle immediate vicinanze e soprattutto verso nord andando a mitigare le temperature del centro abitato di Vado Ligure (che da 29°C passa a 27°C). La temperatura più alta prevista nel parco e nell'intorno è di 28° C. La maggior parte dell'area di progetto risulta ad una temperatura compresa tra i 26.8°C e i 27.7°C mentre nella situazione attuale, a causa della scarsità di vegetazione, quasi metà dell'area risulta attorno ai 29.9°C. L'unico luogo che risulta più caldo è la piazza lungomare che raggiunge una temperatura di 29°C poichè quasi interamente esposta alla radiazione solare diretta.

- *Climax*: al raggiungimento del *climax* il beneficio dell'inserimento del parco risulta sempre evidente. Tutta l'area di progetto mantiene livelli di temperatura compresi tra i 26.8°C e i 28°C. Anche in questo caso l'unica area più calda è la piazza lungomare per le già citate motivazioni.

Per quanto riguarda il confronto tra l'area di progetto con le piante ad uno stato intermedio di crescita e le piante a *climax* si è notato che la temperatura potenziale, al contrario di ciò che si potrebbe immaginare, risulta più alta nel secondo caso, in alcune zone di quasi 1°C, e che le aree a temperatura più bassa sono distribuite in modo diverso. Questa 'anomalia' è spiegata dal fatto che le piante, crescendo, aumentano la loro area fogliare e quindi la loro densità di chioma riducendo il passaggio dell'aria all'interno delle zone a vegetazione più compatta: diminuisce

quindi, anche se di poco, l'effetto di benessere amplificato dalla brezza estiva. Questo dato risulta evidente dall'analisi delle sezioni dell'area di progetto, mettendo in risalto i vettori dei flussi di aria.

2. Analisi dei files di output - Temperatura Media Radiante

- *Area attuale*: la temperatura media radiante risulta per la maggior parte dell'area compresa tra i 61°C e i 67°C. Questo perché l'area è quasi priva di alberature e il suolo è inerbito per circa metà della superficie (uniche zone in cui risulta una temperatura media radiante di 35°C) e per la restante parte è rivestito da un manto di asfalto. In assenza dell'azione mitigatrice delle chiome degli alberi che ombreggiano il suolo, il manto di asfalto si surriscalda anche in virtù del suo colore scuro che trattiene le radiazioni; una pavimentazione più chiara darebbe risultati migliori.

- *Stadio intermedio*: la maggior parte dell'area risulta ad una temperatura media radiante di 30°C grazie alla presenza della vegetazione e alla sua ombra che viene proiettata al suolo mantenendolo a questa temperatura. Le zone più calde sono le piazze poichè pavimentate ed esposte alla radiazione solare diretta (67°C).

- *Climax*: anche in questo caso la temperatura media radiante risulta molto inferiore al confronto con quelle dell'area nell'assetto attuale. In alcuni punti del parco tuttavia la temperatura risulta leggermente più alta (fino a 51°C). Questo poichè l'ombra prodotta dalle alberature risulta spostata a causa della crescita in altezza delle stesse: l'impalcatura si sposta verso l'alto aumentando lo spazio sottochioma dove riescono a filtrare le radiazioni. Le piazze risultano sempre le aree con le temperature più alte (67°C).

Per quanto riguarda il confronto tra l'area di progetto con le piante ad uno stato intermedio di crescita e le piante a *climax*, si è notato che la temperatura media radiante, dipendendo dall'ombra portata della vegetazione al suolo, varia anch'essa in funzione della densità fogliare delle piante utilizzate. Accade quindi che nel tempo la situazione si modifichi per quanto attiene la distribuzione delle differenti temperature, pur mantenendo quella diversità rilevata nel confronto con l'area nell'assetto attuale.

3. Analisi dei files di output - Predicted Mean Vote

- *Area attuale*: a parte le poche zone in cui sono presenti le alberature, in tutto il resto dell'area risulta 'molto caldo', quindi si ha una situazione di *comfort* solo in corrispondenza dell'ombra delle alberature.

- *Stadio intermedio*: con l'inserimento del parco si ha un notevole cambiamento. La maggior parte dell'area, essendo coperta da vegetazione, risulta con un indice PMV compreso tra 1 e 1.5, corrispondente alla sensazione 'leggermente caldo'. Le aree esposte alla radiazione solare diretta sono invece in una situazione di *discomfort*: il PMV è 'molto caldo'. Anche nei parcheggi a raso, grazie all'ombra prodotta dalle alberature, la situazione è quasi di benessere. Inoltre, con la messa a dimora di alberi attorno agli edifici, si ottiene anche nel loro intorno una condizione di *comfort*, sia per gli utenti sia per gli edifici stessi.

- *Climax*: anche con le piante a *climax* in tutte le zone del parco si ha una situazione di quasi benessere con un indice PMV che varia da 1 a 1.5. Uniche aree in cui risulta 'molto caldo' rimangono, come nel caso precedente, le piazze. Anche a raggiungimento del *climax*, nei parcheggi a raso la situazione è quasi di benessere. Con la messa a dimora di alberi attorno agli edifici, si ha anche nel loro intorno, come per la situazione intermedia, una condizione di *comfort*, sia per gli utenti sia per gli edifici.

Per quanto riguarda il confronto tra l'area di progetto con le piante ad uno stadio intermedio di crescita e le piante a *climax*, si è notato che il PMV risulta leggermente variato (nell'ordine dei 0.3 punti), proprio in funzione della variazione della temperatura potenziale, della temperatura media radiante e della riduzione della velocità dei flussi della brezza a causa dell'aumento della densità fogliare.

Caso estivo ore 22:00 - Le simulazioni notturne hanno lo scopo di verificare che nonostante l'inserimento del parco gli utenti siano in una situazione di benessere: infatti è necessario capire se l'abbassamento delle temperature causato dalle piante non sia tale da creare, di notte, una situazione di *discomfort*. (Allegati da 4.25 a 4.30 e allegato 4.32)

1. Analisi dei files di output: Temperatura potenziale

- *Area attuale*: nell'area di progetto allo stato attuale le temperature vanno da 22.15°C a 23.4°C. Nell'intorno la temperatura si mantiene sui 23.4°C a causa della mancanza di vegetazione alta che mitiga il clima. Dove è presente un minimo di vegetazione le temperature vanno da 22°C a 22.9°C.

- *Stadio intermedio*: grazie all'inserimento del parco, con le piante ad uno stadio intermedio di crescita si ha un miglioramento della temperatura. Infatti all'interno del parco le temperature vanno da 21.6°C a 22.4°C e in alcuni punti sono addirittura inferiori a questi valori. Nelle piazze la temperatura si mantiene più alta: tra i 22.4°C e i 22.9°C.

- *Climax*: al raggiungimento del *climax* si ha un cambiamento notevole. Quasi tutta l'area si trova ad una temperatura compresa tra i 21°C e i 21.9°C con una positiva influenza anche sul centro abitato. Ciò si spiega ragionando sul metabolismo delle piante. Un albero respira 24 ore al giorno, utilizzando l'ossigeno e il glucosio prodotti di giorno dalla fotosintesi e liberando in atmosfera anidride carbonica e acqua sotto forma di vapore acqueo. Di notte, a differenza dei quanto accade nelle ore di luce, l'acqua non evapora a causa della radiazione solare e non viene nemmeno utilizzata per la fotosintesi, quindi viene interamente liberata in atmosfera contribuendo all'aumento dell'umidità e all'abbassamento della temperatura. Questo processo è strettamente legato alla massa fogliare: infatti più sono gli elementi che concorrono alla respirazione più vapore acqueo viene emesso e di conseguenza più si abbassa la temperatura. Per questo motivo con le piante a *climax* (esemplari più grandi e con maggiore massa fogliare) la temperatura risulta più bassa che con le piante ad uno stato intermedio di crescita.

2. Analisi dei files di output: Temperatura Media Radiante

- *Area attuale*: la temperatura media radiante risulta prossima ai 13°C nella zona in cui è presente la vegetazione, mentre nel resto dell'area, dove vi è una pavimentazione in asfalto, risulta di circa 16°C. Le due zone sono chiaramente delimitate e nel *file* la differenza, benché minima, è evidente.

- *Stadio intermedio*: con le piante ad uno stadio intermedio di crescita la temperatura media radiante risulta sui 13°C nell'area del parco e compresa tra i 14.5°C e i 15.5°C nelle piazze. La temperatura della pavimentazione risulta più bassa che nell'area attuale in quanto si è scelto un diverso materiale per il rivestimento del suolo: pietre chiare anziché asfalto. Particolarmente determinante è l'influenza delle alberature circostanti che mitigano la temperatura.

- *Climax*: con le piante a *climax* la temperatura della pavimentazione rimane invariata rispetto a quella che ha nello stato intermedio di crescita (compresa tra 14.5°C e i 15.5°C) mentre si alza leggermente quella rilevata all'interno del parco: tra i 13°C e i 14.5°C. Questo ancora per l'aumento dello spazio sottochioma che caratterizza le alberature adulte e che consente una maggiore infiltrazione delle radiazioni solari.

3. Analisi dei files di output: Predicted Mean Vote

- *Area attuale*: essendo notte, quindi in assenza di radiazione solare, il PMV oscilla tra -0.7 e 0, quindi tra una condizione di 'leggero freddo' e benessere.

- *Stadio intermedio*: con l'inserimento del parco il PMV si mantiene sul -0.5 mentre in alcuni punti raggiunge -0.1.

- *Climax*: con le piante a *climax* il PMV varia tra -0.8 e -0.5 quindi risulta leggermente più fresco che con le piante ad uno stadio intermedio di crescita e nell'area con l'assetto attuale. Questo è dovuto alla già citata attività delle piante.

Caso invernale ore 13:00 - con questa serie di simulazioni si vuole verificare che la quantità di alberature sempreverdi e caduche sia ben proporzionata ed equilibrata in modo tale da avere anche in inverno una situazione di benessere. (Allegati da 4.13 a 4.24 e allegato 4.33)

1. Analisi dei files di output: Temperatura potenziale

- *Area attuale*: la temperatura dell'area risulta principalmente compresa tra i 12.26°C e i 12.65°C. L'oscillazione totale di temperatura in tutta l'area in ogni caso è minima, nell'ordine di un solo grado.

- *Stadio intermedio*: con l'inserimento del progetto e con la vegetazione ad uno stadio intermedio di crescita la temperatura del parco risulta attorno ai 12.3°C. Nonostante la presenza di molte piante a foglia caduca che in inverno sono spoglie, a confronto con l'area attuale la temperatura si abbassa leggermente. Nelle piazze la temperatura varia tra 12.5°C e 12.9°C.

- *Climax*: nel progetto con le piante a raggiungimento del *climax* la temperatura risulta maggiore che con le piante ad uno stadio intermedio di crescita e in alcuni punti anche rispetto all'area nell'assetto attuale. Ciò è dovuto al fatto che le piante sempreverdi, crescendo, aumentano la loro area fogliare e la loro dimensione in altezza bloccando le correnti d'aria e creando dei punti riparati dove la temperatura aumenta. La temperatura dominante nel parco è tuttavia 12.3°C.

2. Analisi dei files di output: Temperatura Media Radiante

- *Area attuale*: la temperatura media radiante varia al variare della presenza o meno di vegetazione e al tipo di suolo. Risulta quindi che dove sono presenti alberature la temperatura è compresa tra 12.26°C e 17.76°C, dove vi è erba

è compresa tra 34.26°C e 39.76°C, dove vi è asfalto è compresa tra 45.26°C e 50.76°C.

- *Stadio intermedio*: con l'inserimento del progetto e con le piante ad uno stadio intermedio di crescita, la temperatura media radiante di quasi tutta l'area, nonostante la presenza di caducifoglie, risulta a 12.26°C. Le piazze, esposte completamente alla radiazione solare, raggiungono i 52°C.

- *Climax*: con le piante a *climax* ugualmente tutto il parco risulta ad una temperatura di 12.26°C, con la differenza che, a confronto con l'area con le piante ad uno stadio intermedio di crescita, l'area a questa temperatura è più estesa grazie alla maggiore dimensione delle piante. Le piazze rimangono sempre ad una temperatura di 52°C.

3. Analisi dei files di output: Predicted Mean Vote

- *Area attuale*: a causa della scarsità di alberature (PMV -0.20), quasi tutta l'area, risultando esposta alla radiazione solare, è in una situazione di quasi benessere. Il PMV è compreso tra 0.43 e 0.71.

- *Stadio intermedio*: il PMV all'interno del parco risulta attorno al -0.15 a causa della presenza delle alberature, nonostante molte di queste siano a foglia caduca. In corrispondenza del prato e delle piazze il PMV è compreso tra 0.55 e 0.70, quindi si è in una situazione di quasi benessere.

- *Climax*: il valore del PMV all'interno del parco è più alto rispetto a quello dell'area di progetto con le piante ad uno stadio intermedio di crescita. La maggior parte del parco è in una situazione di quasi benessere (PMV compreso tra -0.13 e 0.01), grazie alle piante che , cresciute, bloccano la corrente creando delle zone riparate anche all'interno del parco stesso. Nelle piazze il valore del PMV è sempre compreso tra 0.55 e 0.70.