

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Edile - Architettura

Laurea in Ingegneria Edile



**L'INFLUENZA DELLA VEGETAZIONE SUL
MICROCLIMA DEGLI AMBIENTI ESTERNI -
UN CASO DI STUDIO**

Tesi di Laurea di:

Daniele Cerizza

Matr. 751713

Relatore: Prof. Enrico De Angelis

Co-relatore: Riccardo Paolini

Anno Accademico 2011 - 2012

AI MIEI GENITORI

RINGRAZIAMENTI

Vorrei ringraziare tutta la mia famiglia, i miei amici e la mia fidanzata per avermi sempre supportato durante la mia carriera universitaria.

Un ringraziamento speciale al dottor Andrea Mainini, per avermi aiutato nell'uso del software Ecotect ed al professor Andrea Vallati per i consigli riguardo alla modellazione dell'intervento mediante il software ENVI-met

ABSTRACT

Analizzando un caso di studio si è effettuata un'analisi microclimatica per valutare l'incidenza della vegetazione sull'intervento. Tramite il software Ecotect si è calcolata la radiazione incidente sull'area di intervento durante il giorno più caldo dell'anno, quindi mediante il programma WUFI si sono determinate le temperature superficiali di un intervento con vegetazione e di uno senza. Si è effettuata, inoltre, un'analisi con il programma ENVI-met, per determinare il valore e la distribuzione nell'area di intervento della temperatura dell'aria, della leaf temperature, delle temperature superficiali e della temperatura operante. I risultati ottenuti dallo studio permettono di quantificare l'incidenza dell'ombreggiamento della vegetazione nell'intervento con una differenza di circa 5 °C tra le temperature superficiali medie annuali e una differenza di circa 25 °C tra le temperature superficiali massime. Si registra inoltre una differenza di 8°C tra le temperature superficiali medie delle superfici in calcestruzzo e delle superfici inerbite durante l'ora più calda dell'anno. Si è valutato infine un'abbassamento di temperatura pari a 7 °C dovuto all'evapotraspirazione durante l'ora più calda dell'anno.

INDICE

1. INTRODUZIONE	12
2. L'INTERVENTO OGGETTO DI STUDIO.....	14
2.1 I vincoli esistenti e gli obiettivi della progettazione.....	14
2.2 La progettazione dell'intervento	17
2.2.1 Il concept	18
2.2.2 Il parcheggio inerbito	21
2.2.3 Opere strutturali.....	23
2.3 Analisi climatica del sito	23
3 LA STRUTTURA DELL'ANALISI	31
4 CALCOLO DELLA RADIAZIONE INCIDENTE SULL'AREA DI INTERVENTO	34
4.1 La modellazione dell'area.....	34
4.2 La trasmissione del calore: l'irraggiamento.....	36
4.3 La riflettenza dei materiali utilizzati	38
4.4 L'analisi.....	40

5 CALCOLO DELLE TEMPERATURE SUPERFICIALI DEL PARCHEGGIO IN REGIME VARIABILE.....	43
5.1 Introduzione.....	43
5.2 Descrizione del modello di calcolo	44
5.4 I componenti analizzati.....	46
5.4.1 Il parcheggio in calcestruzzo	46
5.4.2 Il parcheggio inerbito	48
5.4.3 Le superfici alberate	49
5.5 Risultati dell'analisi	52
5.6 Conclusioni delle analisi igrotermiche	58
6 CALCOLO DELLE TEMPERATURE SUPERFICIALI DEL PARCHEGGIO TRAMITE IL SOFTWARE ENVI-MET	59
6.1 Introduzione.....	59
6.2 La struttura del software.....	60
6.2.1 Input.....	61
6.2.2 L'interfaccia di simulazione	62
6.2.3 Output.....	62
6.3 Modelli di calcolo	63
6.3.1 Ipotesi di calcolo.....	63
6.3.2 Modello della temperatura e dell'umidità.....	64
6.3.3 Modello dei flussi radiativi	64
6.3.4 Modello del vento	67
6.3.5 Modello della vegetazione.....	69
6.3.6 Modello del suolo	72
6.3.7 Modello delle turbolenze	73
6.3.8 Superfici.....	76
6.4 Risultati dell'analisi	80
6.4.1 Atmosphere	80
6.4.2 Inflow.....	80
6.4.2.1 Receptors	81
6.4.2.2 Soils.....	82

6.4.2.3 Surface	82
6.5 Interfacce di lettura degli output	83
6.5.1 Leonardo	83
6.5.2 Xtract	84
6.6 L'analisi dell'intervento	85
6.7 Risultati... ..	88
6.7.1 La distribuzione della temperatura media radiante	88
6.7.2 La distribuzione della temperatura potenziale.....	90
6.7.3 La distribuzione della temperatura superficiale.....	92
6.7.4 La distribuzione della leaf temperature	94
7 CONCLUSIONI	95
7.1 Risultati ottenuti.....	95
7.2 Sviluppi futuri	96
BIBLIOGRAFIA	105

1. INTRODUZIONE

Questo elaborato di tesi nasce dall'esperienza personale di stage svolta per diversi mesi presso lo studio di progettazione MECO Engineering. Questa stimolante esperienza lavorativa mi ha permesso di confrontarmi con diverse realtà, pubbliche e private, e di approfondire molteplici problematiche architettoniche, costruttive ed energetiche partecipando con occhio critico alla progettazione di diversi interventi. Proprio dal più particolare e caratteristico di questi progetti nasce la personale curiosità di approfondire la tematica dell'incidenza ambientale delle aree verdi nelle aree urbane. Durante la progettazione di quest'ultimo intervento, maturato in collaborazione con diversi professionisti e che sarà successivamente descritto, questo interesse si è concretizzato in un'analisi approfondita. Un accorta ricerca infatti ha confermato il dubbio di non poter esprimere con dati precisi ed attendibili l'influenza climatica della aree verdi all'interno in un intervento. Questa lacuna nelle scienze dell'edilizia è probabilmente dovuta al limitato interesse, fino ad oggi, per l'impatto ambientale degli edifici, nonché alla mancanza di metodi e strumenti necessari a simulare il comportamento termodinamico dell'intervento nel suo insieme. Il recente interesse della pubblica amministrazione per la sostenibilità e l'impatto ambientale dei nuovi interventi, invece, sta stimolando i professionisti ad effettuare nuovi approfondimenti ed analisi di carattere termodinamico per dimostrare quantitativamente i vantaggi di un progetto ecosostenibile. E' luogo comune, infatti, sostenere che "la presenza di vegetazione all'interno di un area migliora il microclima della zona" oppure che "riduca l'impatto ambientale dell'intervento" (*"Paolo Abram, Giardini Pensili, Coperture a verde e gestione delle acque meteoriche, 2004; Emanuele Bortolotti, Il verde possibile, 2005"*). Imprecise, approssimative e contraddittorie tra loro sono invece le indicazioni quantitative di questo "miglioramento ambientale", che rischia quindi di essere o sovrastimato o sottostimato.

Lo scopo di questo elaborato di tesi è quindi approfondire le precedenti tematiche ambientali, microclimatiche e termodinamiche in un intervento di architettura sostenibile. L'elaborato non vuole criticare le scelte tecnologiche ed architettoniche del progetto, ma solamente valutarne il comportamento reale. L'elaborato oggetto di studio è la risposta progettuale ad un concorso di idee bandito dall'Autorità Portuale di Savona ed è frutto di una progettazione congiunta tra gli studi Scape e Meco Engineering. Si tratta di un intervento di recupero per valorizzare un'area dismessa tra la zona portuale di Bergeggi e la spiaggia e prevede la realizzazione di un parcheggio sopra un fabbricato ad uso portuale e di una zona verde di mitigazione tra l'area industriale e la spiaggia.

Lo studio che verrà successivamente illustrato è rivolto al calcolo delle temperature superficiali e della temperatura media dell'aria nell'area di intervento e ha lo scopo di quantificare la differenza di impatto ambientale tra un intervento progettato con aree verdi e ed uno identico senza vegetazione. Per lo svolgimento di quest'analisi si è reso necessario l'ausilio informatico di alcuni software specialistici in grado di simulare il comportamento micro-ambientale delle zone interessate e restituire dati attendibili. Tali strumenti sono stati individuati nei software Ecotect, WUFI e ENVI-met. Il software Ecotect è un programma che permette di eseguire analisi specifiche sulle prestazioni energetiche e l'integrazione climatica degli edifici attraverso strumenti per la creazione e importazione geometrica dei modelli, per la contestualizzazione geografica e per la caratterizzazione tecnologica dell'edificio. Tramite questo programma, dopo aver modellato l'intera area di intervento, si è svolta un'analisi illuminotecnica dalla quale è stato possibile calcolare la radiazione solare incidente. Si è quindi utilizzato il software WUFI per determinare le temperature superficiali nelle aree in cemento del parcheggio e l'incidenza degli ombreggiamenti, utilizzando la radiazione precedentemente calcolata. WUFI è un programma nato principalmente per il calcolo dinamico delle condense interstiziali e analizza il comportamento termodinamico di un elemento tecnico per un determinato periodo di tempo tramite il metodo degli elementi finiti. Si è impiegato infine il software ENVI-met per il calcolo della temperatura dell'aria e delle temperature superficiali delle aree con vegetazione, per tener conto del fenomeno dell'evapotraspirazione. Quest'ultimo software, sviluppato all'interno di un contesto di ricerca universitario tedesco, è stato realizzato proprio con la finalità di indagine del comportamento microclimatico e la sua applicazione in diversi studi in tutto il mondo ha mostrato la sua attendibilità soprattutto nell'ambito degli effetti della vegetazione in ambito urbano.

2. L'INTERVENTO OGGETTO DI STUDIO

2.1 I vincoli esistenti e gli obiettivi della progettazione

Il 25 maggio 2011, l'Autorità Portuale di Savona bandisce un pubblico concorso di idee per la progettazione di opere ed interventi nel terrapieno SUD del bacino di Vado Ligure – Bergeggi relativi alla zona di separazione tra le aree portuali ed il litorale nell'ambito delle opere marittime esistenti. La superficie interessata è situata nel comune di Bergeggi, al confine tra l'arenile destinato alla balneazione e la zona adibita ad attività portuali. Attualmente l'area comprende un parcheggio sterrato ed una parcheggio per disabili alla quota della statale Aurelia (*Fig.1*).

Il bando prevede che l'intervento possa comprendere anche zone contigue qualora ritenute utili ed una migliore definizione funzionale ed estetica dello stesso, fermo restando i limiti inderogabili indicati in *fig.2*. I confini obbligatori sono costituiti da una diga preesistente, la quale non può essere né abbattuta, né abbassata, che separa l'area di intervento dal mare e dal "fronte portuale", limite situato ad una distanza di 6.5 m dalla recinzione doganale.

L'obiettivo del concorso è la realizzazione di un parcheggio ad utilizzo pubblico di capienza circa equivalente a quello esistente, di un volume sottostante destinato ad utilizzo portuale e di opere che costituiscano filtro visivo, acustico ed ambientale tra il litorale e la zona del porto commerciale. La proposta progettuale deve garantire, nel rispetto dei vincoli urbanistici, il soddisfacimento delle caratteristiche funzionali ed ambientali definite in seguito, con soluzioni di elevato pregio estetico e paesistico. Essa deve assicurare una mitigazione delle emissioni delle attività portuali nonché creare un insieme compositamente armonico e di riqualificazione ambientale ed estetica dell'area, curando l'inserimento paesistico. I vincoli al contorno sono

rappresentati in *figura 4*; in particolare l'area è divisa nelle due sottozone A1 e A2, la prima coincidente con l'esistente parcheggio per persone disabili e la seconda destinata agli accessi al litorale, a parcheggio ad utilizzo pubblico urbano e ad uso delle attività portuali a livello banchina.



Figura 1: Google Maps View dell' area di intervento

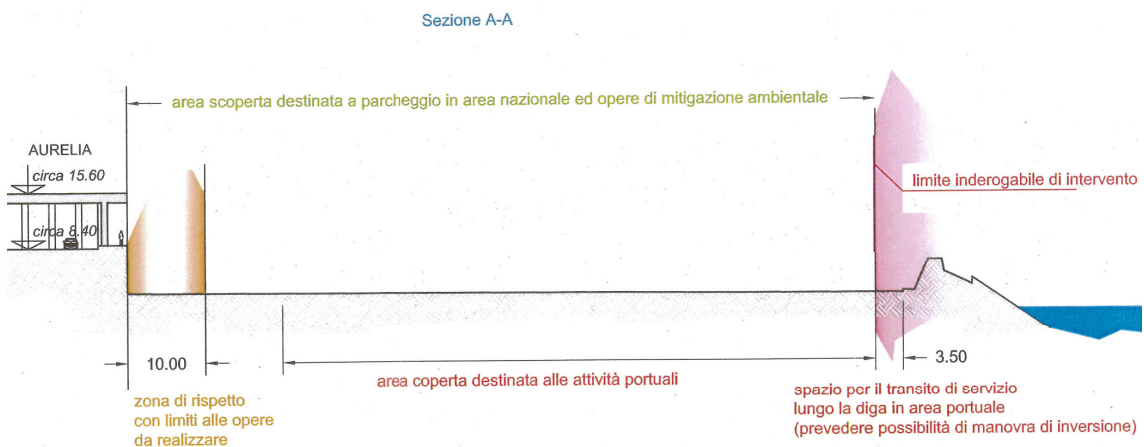


Figura 2: limiti inderogabili dell'intervento, sezione A-A

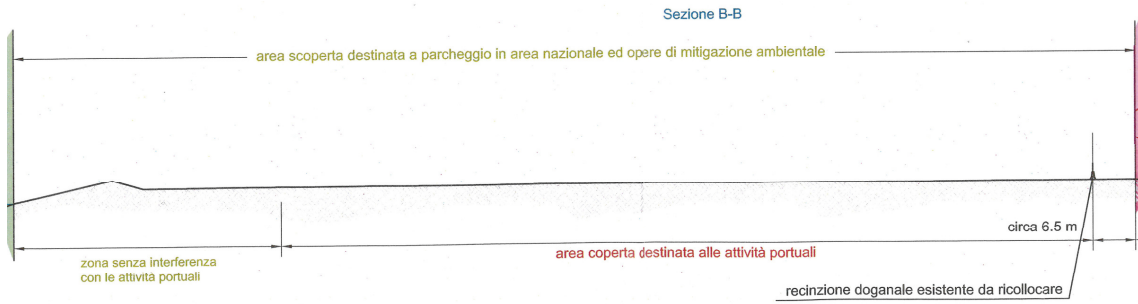


Figura 3: limiti inderogabili dell'intervento

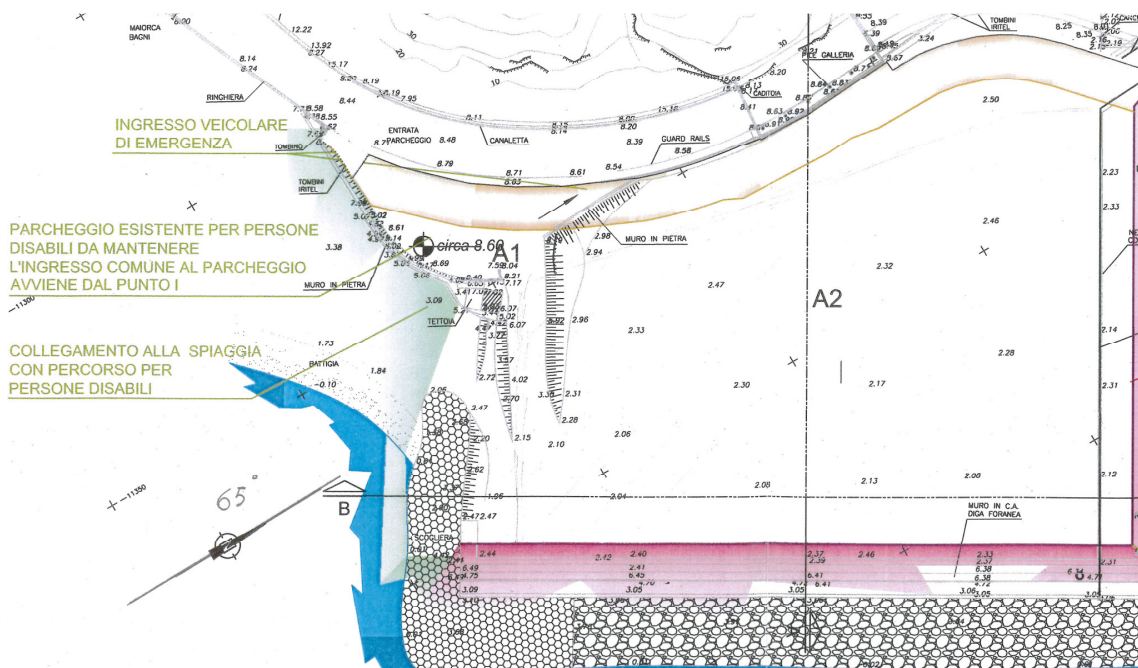


Figura 4: pianimetria generale

Le caratteristiche funzionali, i vincoli e i gradi di libertà relativi alle diverse aree sono esposti nel dettaglio in seguito.

Zona A1:

- deve mantenere la funzione prevalente di parcheggio per persone a mobilità ridotta;
- deve mantenere il più possibile la capienza precedente (circa 20 posti auto);
- deve mantenere la complanarità con la SS 1 Aurelia per permettere un collegamento veicolare d'emergenza;
- può cambiare di forma e superficie.

Zona A2:

- deve assolvere allo scopo di creare una barriera visiva, acustica, ambientale tra le attività portuali/parcheggio ed il litorale d'altezza adeguata e comunque non inferiore a 15 m sul livello del mare;
- deve consentire un percorso di collegamento per persone disabili tra l'area A1 e la spiaggia;
- deve accogliere un parcheggio riservato alle automobili con una capacità circa corrispondente a quello sterrato attualmente esistente;
- l'accesso al parcheggio deve avvenire tramite il punto I, situato a nord-est della planimetria, per mezzo di rampa;
- la posizione e a forma della rampa è libera, ma non deve creare ostruzione al fronte portuale;
- deve essere previsto un percorso pedonale di collegamento tra il punto I ed il litorale;
- deve essere considerata la fascia di rispetto della SS 1 Aurelia, pari a 10 m. Entro tale distanza non possono essere realizzate strutture fisse, ma può essere realizzato un riempimento con terreno, anche sagomato a quota superiore dell'Aurelia;
- deve contenere un volume di 10000 m³ destinato ad attività produttive portuali, di cui almeno 5000 m³ con un'altezza utile non inferiore a 8,5 m, posti in prossimità del fronte portuale.

2.2 La progettazione dell'intervento

Lo sviluppo del progetto architettonico ha avuto come tema principale quello di approfondire lo studio di mitigazione ambientale del nuovo parcheggio e del volume destinato ad attività portuali nel terrapieno SUD del bacino di Vado Ligure - Bergeggi risolvendo contemporaneamente il rapporto fra la nuova struttura ed il litorale. Per perseguire tale obiettivo si è fatto ricorso ad una attenta lettura degli elementi specifici del paesaggio: le tracce, i segni, la morfologia, la materia, la vegetazione, la luce. La costa ligure è fortemente caratterizzata da un rapporto terra-mare unico nel suo genere, definito da declivi ripidi e rocciosi, salti di quota improvvisi ed acuti, strade tortuose e da importanti infrastrutture che, nel tempo, sono entrate a far parte dell'immaginario collettivo di chi percorre frequentemente la regione e che ad oggi sono parte integrante del paesaggio e compongono quello che viene definito "proprio paesaggio artificiale". Il progetto vuole ritrovare nella specificità del luogo la chiave di lettura per dar forma ad un nuovo paesaggio artificiale.

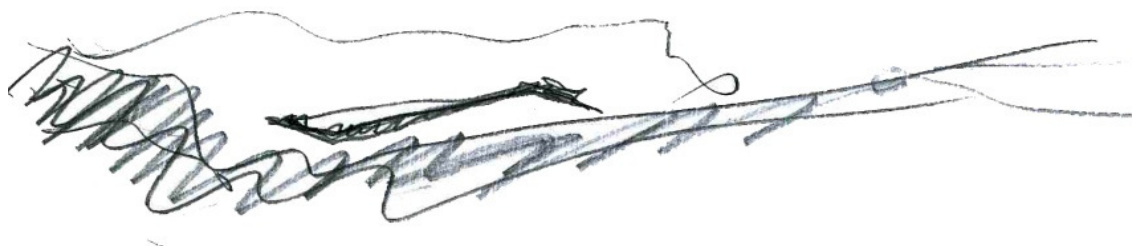


Figura 5: il concept di base

2.2.1 Il concept

L'ipotesi progettuale propone una modellazione tridimensionale, ispirata alle forme e geometrie della morfologia del paesaggio circostante, della piastra parcheggio stravolgendone lo schema tradizionale. Un grande solaio a pendenza variabile risolve in un unico gesto le richieste del bando creando una barriera acustica e visiva verso il litorale, un parcheggio da 550 posti auto circa ed un volume sottostante dedicato ad attività portuali. Le auto, protagoniste indiscusse del litorale nei fine settimana estivi, assecondano le pendenze del terreno artificiale e si nascondono fra di esse partecipando al disegno generale del luogo. Il sistema, nel suo insieme, vuole essere alla quota pubblica uno spazio ibrido: un parco, un parcheggio, un belvedere, una discesa a mare, uno spazio polivalente per manifestazioni all'aperto, per un mercato.

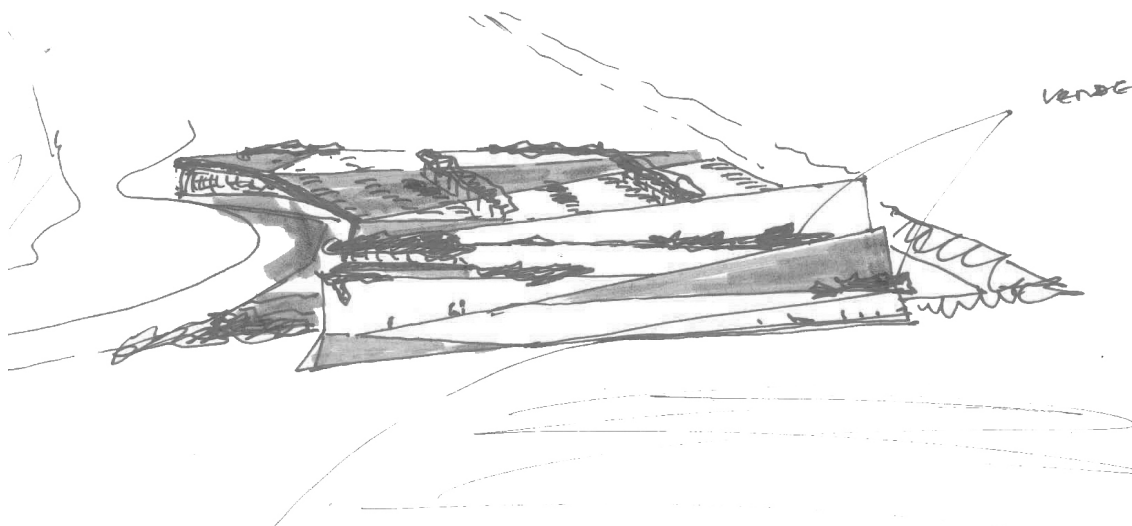


Figura 6: sviluppo del concept

L'intervento è inteso come un tassello di un sistema più ampio che sta coinvolgendo la costa ligure e che si è concretizzato nel recupero della vecchia linea ferroviaria Genova - Ventimiglia, convertendola in una pista ciclabile. La fascia di rispetto fra l'Aurelia e l'intervento viene infatti sfruttata come percorso ciclo-pedonale, costeggiato dal verde, direttamente collegato con la piastra di progetto. L'ideale sarebbe poter raggiungere l'area con la bicicletta, magari ipotizzando un punto di sosta di un sistema più ampio di bike sharing che coinvolga il tratto costiero. Il parcheggio alterna zone pavimentate a superfici verdi seguendo un disegno geometrico a trama triangolare con pendenze diverse, ma mai superiori al 6%. Fra le macchine, filari di alberi si alternano a griglie che permettono l'aerazione e l'illuminazione del volume portuale sottostante. La scelta di limitare l'uso di alberature è dettata dalla volontà di rendere lo spazio flessibile ed in particolare di permettere l'uso per manifestazioni all'aperto che prevedono quindi assembramenti di persone. Dal parcheggio, un percorso pedonale collega dolcemente lo spazio principale con l'area destinata a parcheggio disabili ed alla spiaggia. Qui le "pieghe" diventano più importanti ai fini di nascondere le auto: un vero e proprio paesaggio artificiale permette di costruire delle aree verdi di sosta, una zona belvedere verso il mare. L'ultima "piega" del sistema sfiora infatti l'acqua e può essere utilizzata come vera e propria discesa a mare. L'obiettivo è che questa parte dell'intervento diventi un vero e proprio punto di sosta, di gioco. Al di sotto del sistema, lo spazio destinato ad usi portuali subisce anch'esso le operazioni formali dell'intervento. Grandi falde inclinate soddisfano le richieste del bando in termini di altezza e conferiscono al volume una qualità spaziale. Qualità che nella tradizione italiana degli anni '60 ritroviamo negli hangar aeroportuali di Nervi o nelle strutture di Moretti.



Figura 7: sezione longitudinale

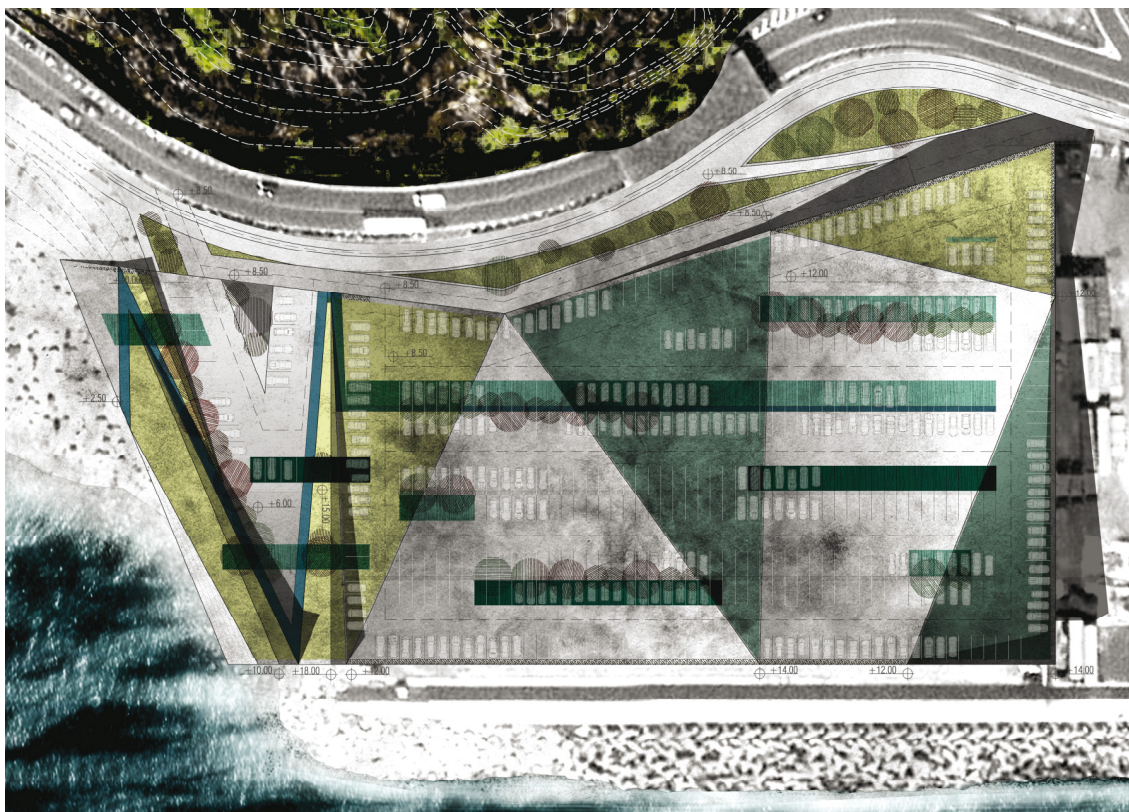


Figura 8: planimetria di progetto

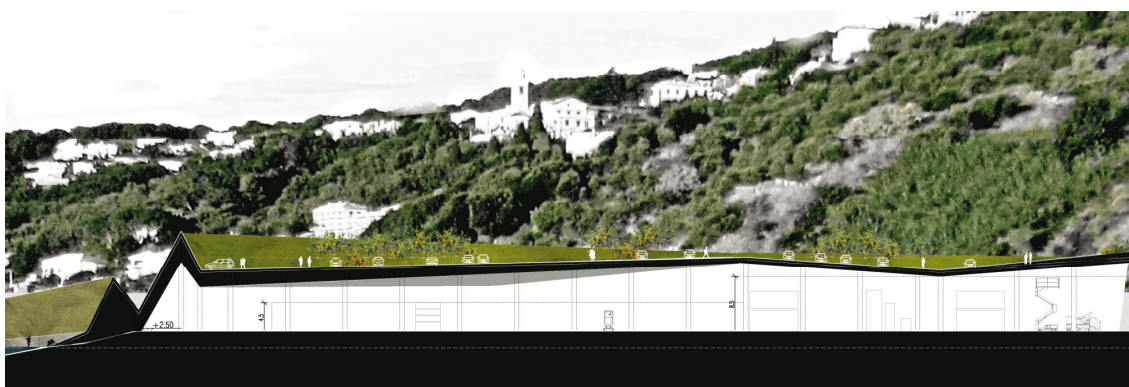


Figura 9: sezione trasversale

2.2.2 Il parcheggio inerbito

Alcuni settori del parcheggio sono realizzati con moduli in materiale plastico inerbito, che si presta anche all'intasamento con ghiaie per pedonalizzare alcune vie di transito. La tecnica costruttiva consiste nel creare un'adeguata fondazione in materiale misto di cava, nel quale è ordito il sistema drenante, per consentire il rapido deflusso delle acque meteoriche dalla sottostante soletta. Il materiale di allettamento da inerbitare è costituito da terriccio miscelato con ghiaietto, che è seminato con un miscuglio di sementi macroterme, molto resistenti a siccità ed eccesso di salinità cui concorre la prossimità del mare. Tali caratteristiche delle sementi non escludono la necessità di realizzare un adeguato impianto d'irrigazione a pioggia, che sarà messo in funzione nelle ore serali, onde garantire la migliore conservazione del tappeto erboso. L'usura alla quale è sottoposto a causa del massiccio utilizzo estivo dell'infrastruttura è indubbiamente compensata dalla regolare irrigazione e dalle eventuali trasemine eseguite nei periodi di scarso utilizzo. La piantumazione, sebbene non continua, si rivela indispensabile allo scopo di ombreggiare l'infrastruttura, specie in corrispondenza dei percorsi pedonali di accesso; la discontinuità intende riproporre la suggestione episodica della macchia mediterranea, presente sul rilievo collinare a monte della litoranea, utilizzando diverse essenze vegetali con portamento ad alberello delle specie *Albitia julibrissin*, *Nerium oleander*, *Tamarix gallica*, *Ligustrum spp.*



Figura 10: planimetria con vegetazione



Figura 11: esempio di parcheggio inerbito

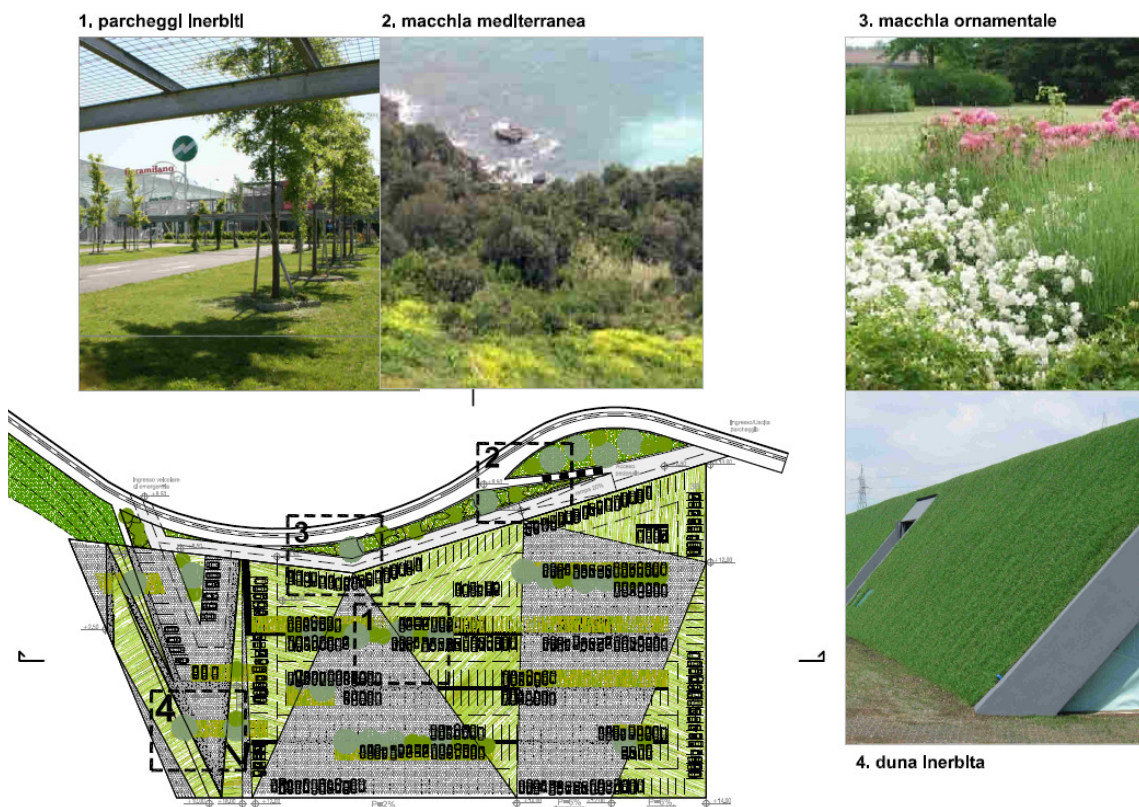


Figura 12: landscape con riferimento planimetrico

2.2.3 Opere strutturali

La particolare conformazione architettonica dell'edificio ne consiglia l'esecuzione in calcestruzzo armato gettato in opera. Questa tecnica tradizionale e consolidata, grazie alla diffusione sul mercato dell'edilizia, avvenuta negli ultimi anni, di tecnologie moderne ed efficienti sia nel settore delle casseforme che della produzione e messa in opera del calcestruzzo, è divenuta sempre più efficiente consentendo di realizzare manufatti di qualità elevata e costante. Essa è qualitativamente comparabile, se non superiore, a quella finora associata alla prefabbricazione in stabilimento, pur conservando la sua grande peculiarità, ovvero la possibilità di realizzare le forme più appropriate o desiderate per garantire la più ampia flessibilità di utilizzo del fabbricato. La struttura proposta pertanto si compone di una copertura costituita da una piastra in conglomerato cementizio armato alleggerito con elementi sferici cavi in materiale plastico, sostenuta da una maglia regolare di pilastri fondati su plinti diretti. Presso il lato nord e ovest invece si realizzeranno due muri di contenimento anch'essi in cemento armato. La piastra presenterà opportune zone piene di rinforzo sia in corrispondenza dei pilastri sia presso le linee di cambiamento di pendenza che la caratterizzano. In considerazione dell'ambiente marino aggressivo, in cui l'opera si verrà a trovare, particolare cura e attenzione sarà riservata alla realizzazione dei particolari costruttivi ed alla qualità dei materiali da utilizzare. Per quanto attiene specificatamente al calcestruzzo, si impiegheranno cementi (portland al calcare o pozzolanici) di tipo, qualità e resistenza adatte a garantire, insieme ad una specifica formulazione del mix design del conglomerato cementizio, la corretta durabilità dell'opera, così come previsto dalla normativa in vigore.

2.3 Analisi climatica del sito

Per conoscere le condizioni atmosferiche a cui è esposto l'intervento si è svolta un'indagine climatica del sito, apprendendo dati fondamentali quali le temperature di bulbo secco e di bulbo umido, le umidità relative, le temperature superficiali del suolo, le velocità del vento e la radiazione incidente per ogni giorno dell'anno. I dati sono stati reperiti dal sito del software EnergyPlus (www.energy.gov) e sono stati trasformati in grafici mediante Climate Consultant: un software che gestisce i dati forniti visualizzando i grafici più significativi per l'utente. Alcuni grafici sono stati estrapolati anche dal weather tool del software Ecotect. Per quanto riguarda la provenienza geografica dei dati, si è fatto riferimento alle misure climatiche di Genova in quanto erano le migliori disponibili considerando la vicinanza tra le due città e la simile conformazione orografica.

Lo scopo dell'analisi climatica, oltre a ricavare dati sulle condizioni climatiche di Bergeggi, ha lo scopo di individuare il giorno e l'ora con la radiazione più alta dell'anno. In questo modo si potranno svolgere le analisi precedentemente descritte nell'ora più calda dell'anno, calcolando le temperature massime.

Tabella 1: dati climatici

DATI CLIMATICI	
Posizione	Genova - Sestri, Italy
Latitudine	44.42° North
Longitudine	08.85° East
Time zone da Greenwich	1
Fonte	IGDG 161200 WMO Station Number
Altezza sul livello del mare	3 m

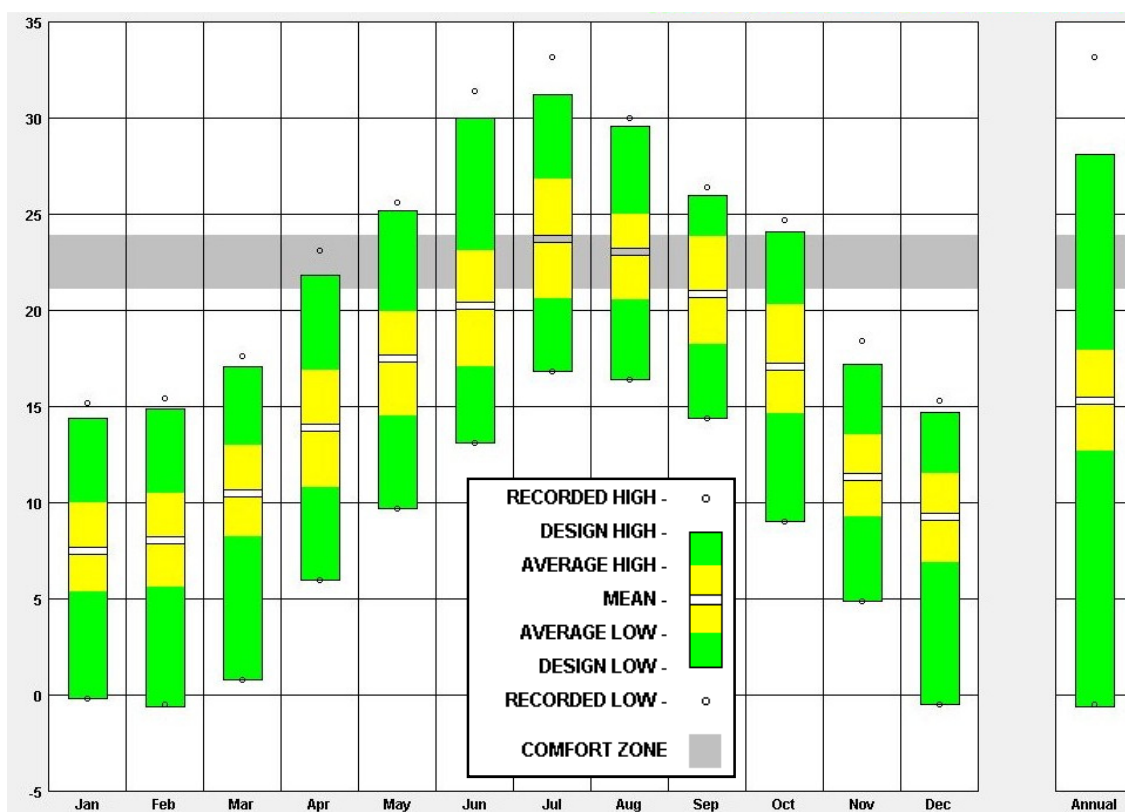


Figura 13: campo delle temperature mensili

Analizziamo, innanzitutto, l'andamento della temperatura durante l'anno estrapolando un grafico (fig.13) che esprime il campo delle temperature per ogni mese ed evidenzia i valori alti, bassi e medi. Possiamo notare che la temperatura, anche nei mesi invernali, risulta raramente

sottozero; in estate invece si sottolineano dei picchi di massima di 31 °C. Complessivamente la temperatura della zona può essere valutata mite, considerando che le temperature medie mensili sono comprese tra i 7 ed i 24 °C.

Il mese con la temperatura più alta, considerando il picco di massima e la media risulta luglio.

Si è indagato quindi riguardo alle temperature medie mensili del terreno (*fig. 15*) esaminando lo stesso a diverse quote, rispettivamente a 0.5 m, 2.0 m e 4.0 m di profondità. Dai risultati notiamo che il mese in cui il terreno è più freddo risulta marzo, il mese in cui è più caldo risulta settembre. Le curve di oscillazione delle temperature del suolo a differenti profondità, seppur differenti in ampiezza, evidenziano una media comune attorno ai 15 °C.

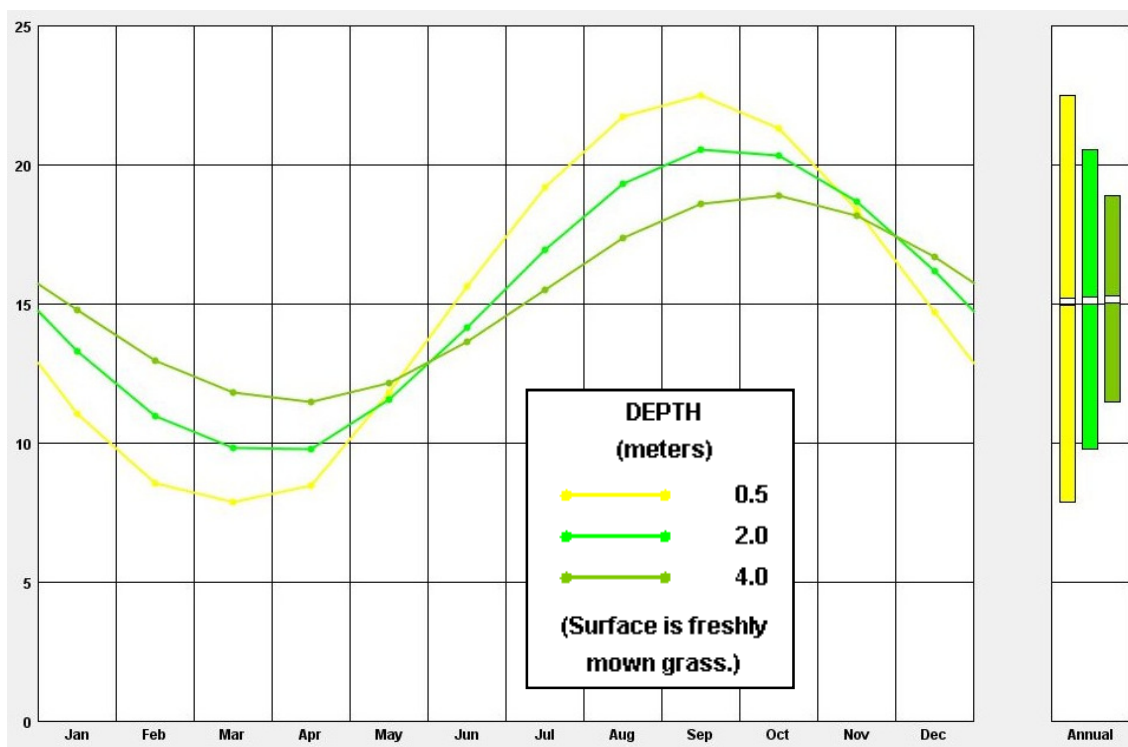


Figura 14:andamento delle temperature mensili del terreno

In *fig. 15* si indica il campo delle velocità medie mensili del vento. Dal grafico si nota che la zona in questione è caratterizzata normalmente da vento di modesta entità; la velocità media annuale infatti è sotto i 4 metri al secondo.

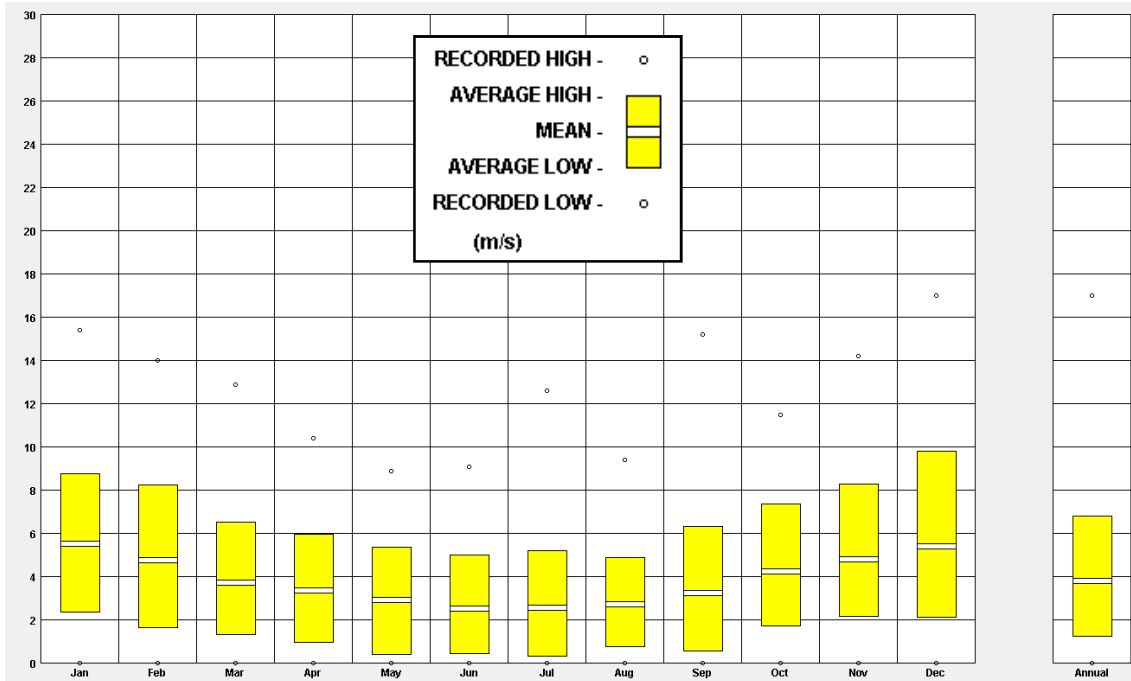


Figura 15: campo delle velocità del vento

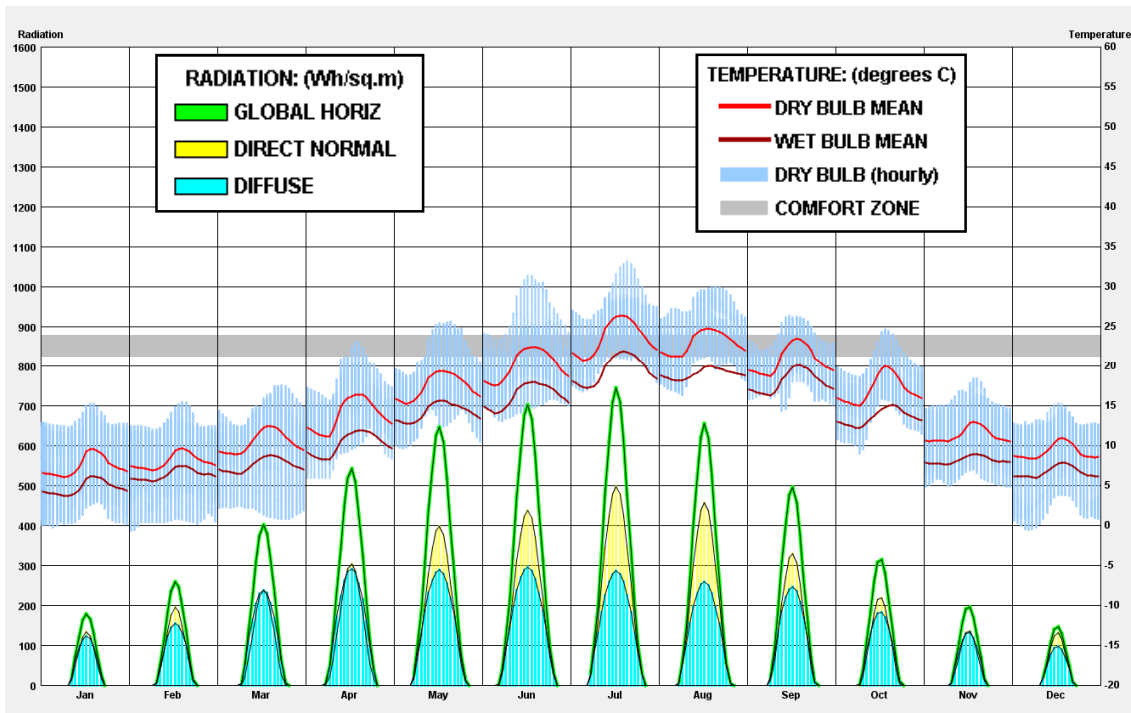


Figura 16: andamento della temperatura e della radiazione media mensile

Il grafico in *fig.13* evidenzia la variazione giornaliera delle temperature di bulbo secco e di bulbo umido e le rispettive medie (in gradi Celsius), e la radiazione globale orizzontale, la radiazione normale diretta e la radiazione diffusa (in Wh/m^2).

Dal grafico risulta che il mese con le radiazioni globale, diretta e diffusa più alta è luglio.

Le stesse radiazioni vengono esplicitate nel grafico successivo (*fig.15*) con dei valori medi mensili che esprimono il campo di variazione mensile della radiazione. I dati si riferiscono ad una superficie orizzontale completamente esposta alla volta celeste e orientata verso nord. Si utilizza inoltre come condizione al contorno una riflettanza del terreno pari al 20%.

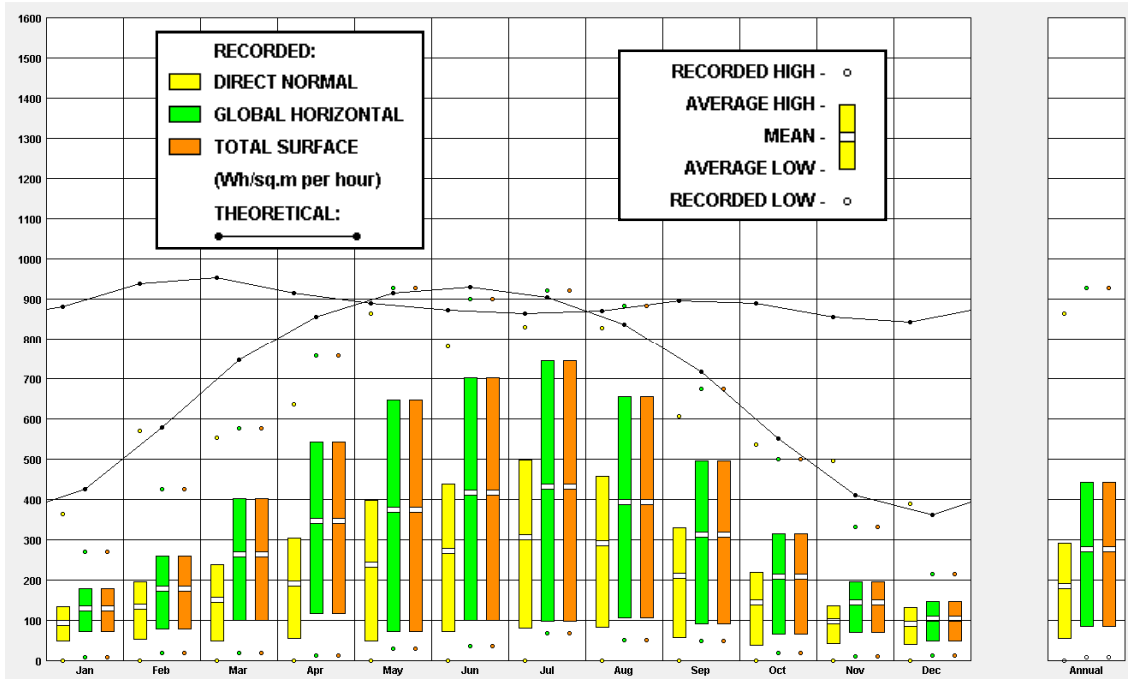


Figura 17: campo delle radiazioni mensili

Si analizza nello specifico il mese di luglio, risultato il mese più caldo e con il picco di radiazione più elevato. Si vuole conoscere il giorno e quindi l'ora più calde dell'anno e i rispettivi valori di radiazione diretta e diffusa. Le analisi successive infatti saranno effettuate durante il giorno più caldo per poter determinare e confrontare le temperature massime. L'incidenza della vegetazione sull'intervento, quindi, viene valutata durante il giorno e durante l'ora in cui la radiazione solare è maggiore.

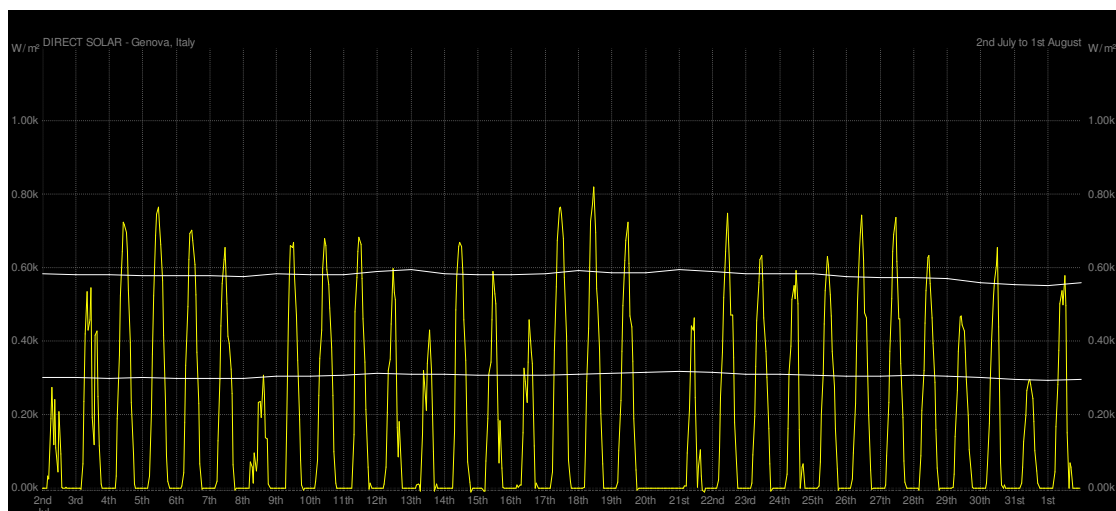


Figura 18: radiazione solare diretta nel mese di luglio

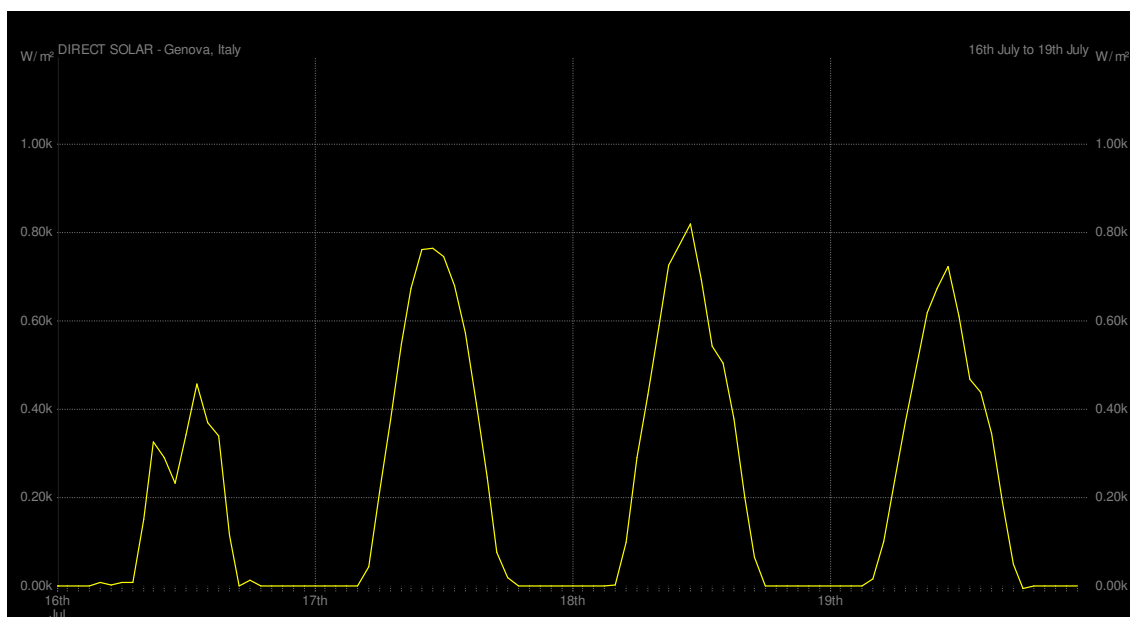


Figura 19: radiazione solare diretta durante il 16, 17, 18, 19 luglio

Dai grafici in *fig.18* e *fig.19* si nota che il giorno in cui la radiazione solare diretta risulta maggiore è il 18 luglio. Si analizzi dunque tale giorno, riportando radiazione diretta, radiazione diffusa, temperatura, umidità relativa, velocità del vento e nuvolosità.

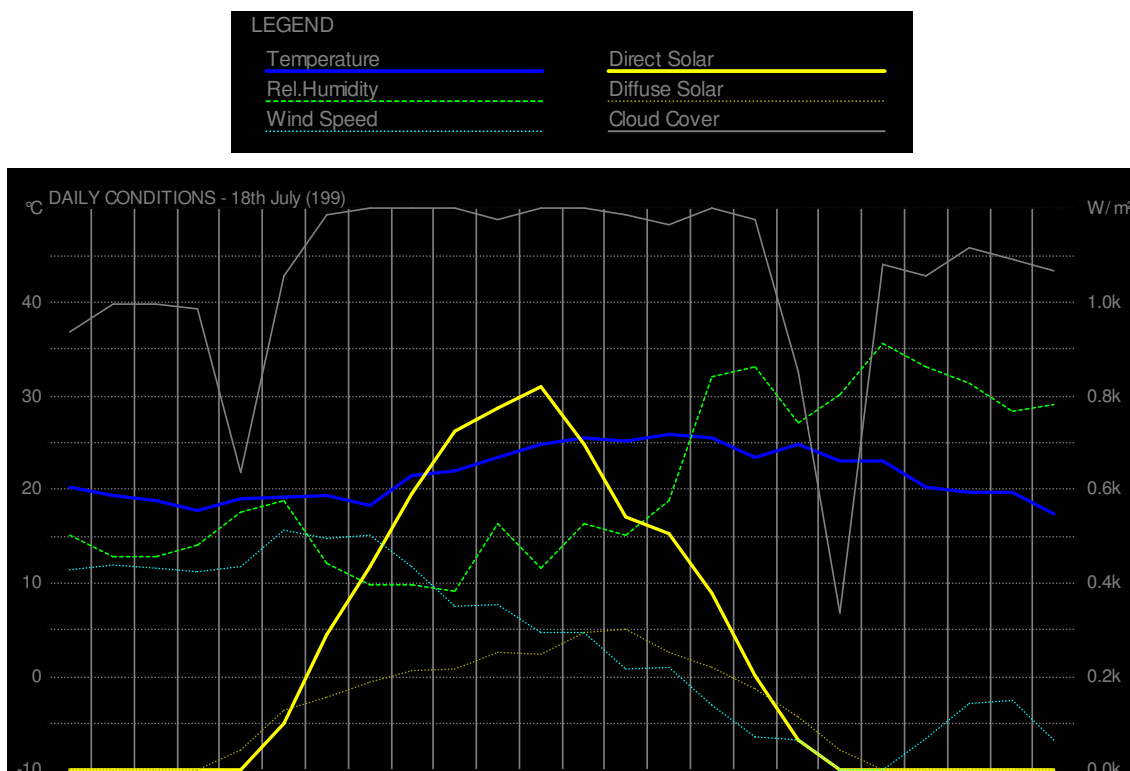


Figura 20: variazione della radiazione durante il 18 luglio

Tabella 2: dati climatici, 18 luglio

Or	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Temperatura [°C]	21.4	22	23.4	24.7	25.4	25.1	25.8	25.4	23.4	24.7	22.9
Umidità [%]	32	32	44	35	44	41	48	70	70	62	64
Radiazione diretta [W/m²]	590	726	773	821	696	543	505	379	203	65	0
Radiazione diffusa [W/m²]	212	218	251	250	294	301	253	221	174	114	44
Velocità del vento [m/s]	21.8	17.6	17.8	14.7	14.7	10.9	11	7	3.6	3.2	0

Dall'analisi climatica risulta quindi che il giorno in cui la radiazione solare è maggiore è il 18 luglio. Durante il giorno in questione, l'ora in cui la radiazione solare è maggiore (somma della radiazione diretta e diffusa) corrisponde alle 11.00, l'ora in cui la temperatura è maggiore risulta alle 14.00.

Tabella 3: sommario dati climatici

	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC	u.m.
Radiazione globale orizzontale (media oraria)	130	178	264	346	374	416	430	393	312	209	145	104	Wh/m ²
Radiazione normale diretta (media oraria)	94	133	150	191	238	271	306	292	210	144	98	91	Wh/m ²
Radiazione diffusa (media oraria)	96	117	177	214	198	208	200	185	179	135	104	74	Wh/m ²
Radiazione globale orizzontale (massima oraria)	270	426	576	757	928	900	922	882	674	499	332	215	Wh/m ²
Radiazione normale diretta (massima oraria)	363	570	553	637	864	781	830	827	606	536	495	389	Wh/m ²
Radiazione diffusa (massima oraria)	363	570	553	637	864	781	830	827	606	1927	495	389	Wh/m ²
Radiazione globale orizzontale (totale media giornaliera)	963	1520	2638	3901	4906	5481	4655	4680	3317	1316	1093	762	Wh/m ²
Radiazione normale diretta (totale media giornaliera)	691	1122	1491	2150	3125	3581	4035	3469	2224	126	736	668	Wh/m ²
Radiazione diffusa (totale media giornaliera)	726	1016	1784	2442	2613	2779	2653	2237	1929	0	800	549	Wh/m ²
Illuminazione globale orizzontale (media oraria)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	lux
Illuminazione normale diretta (media oraria)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	lux
Temperatura di bulbo secco (media mensile)	7	8	10	13	17	20	23	23	20	17	11	9	°C
Temperatura di dew point (media mensile)	0	4	4	6	12	13	17	17	16	11	4	3	°C
Umidità relativa (media mensile)	65	78	68	64	72	68	69	69	77	68	66	69	%
Direzione del vento (media mensile)	110	50	20	200	60	230	50	280	40	50	140	90	°
Velocità del vento (media mensile)	5	4	3	3	2	2	2	2	2	4	4	5	m/s
Temperatura del terreno (media mensile a 3m di profondità)	12	10	9	9	11	14	19	19	20	19	18	15	°C

3 LA STRUTTURA DELL'ANALISI

Lo studio microclimatico si propone di comprendere il reale comportamento dell'intervento oggetto di studio tramite il calcolo delle temperature superficiali, della temperatura dell'aria e della temperatura operante. Per quantificare l'incidenza della vegetazione, inoltre, si è deciso di confrontare le temperature superficiali dell'area di intervento con le temperature superficiali di un parcheggio, identico al primo, ma privo di vegetazione.

Si è utilizzato inizialmente il software Ecotect per quantificare la radiazione incidente sull'area del parcheggio: tramite l'interfaccia grafica del programma si è modellata l'intera area di intervento, quindi si sono effettuate le analisi illuminotecniche. Si è effettuata, innanzitutto, un'analisi per calcolare la radiazione solare incidente nella superficie del parcheggio per ogni ora dell'anno. Dopodiché si è modellata una griglia dividendo l'area del parcheggio in celle e si è eseguita un'analisi durante il giorno con la radiazione più alta dell'anno al fine di determinare la distribuzione della radiazione nell'area.

Per calcolare le temperature superficiali delle diverse zone del parcheggio, si è utilizzato il software WUFI. Si sono definite le sezioni correnti del parcheggio ed i materiali con le rispettive proprietà e si è determinata la temperatura superficiale utilizzando la radiazione precedentemente calcolata.

Si è effettuata, infine, un'analisi con il programma ENVI-met, per determinare il valore e la distribuzione nell'area della temperatura dell'aria, della leaf temperature, delle temperature superficiali e della temperatura operante. Tramite il software, inoltre, si è calcolata l'incidenza

della vegetazione nell'intervento tramite il confronto tra un parcheggio inerbito ed un parcheggio in calcestruzzo. Per mezzo dell'interfaccia grafica del software, infatti, si sono creati due modelli: un parcheggio inerbito (come descritto precedentemente) ed un parcheggio in calcestruzzo, identico al primo ma privo di vegetazione. Per mezzo di un confronto tra le temperature dei due parcheggi, infine, si è quantificata l'incidenza delle superfici verdi.

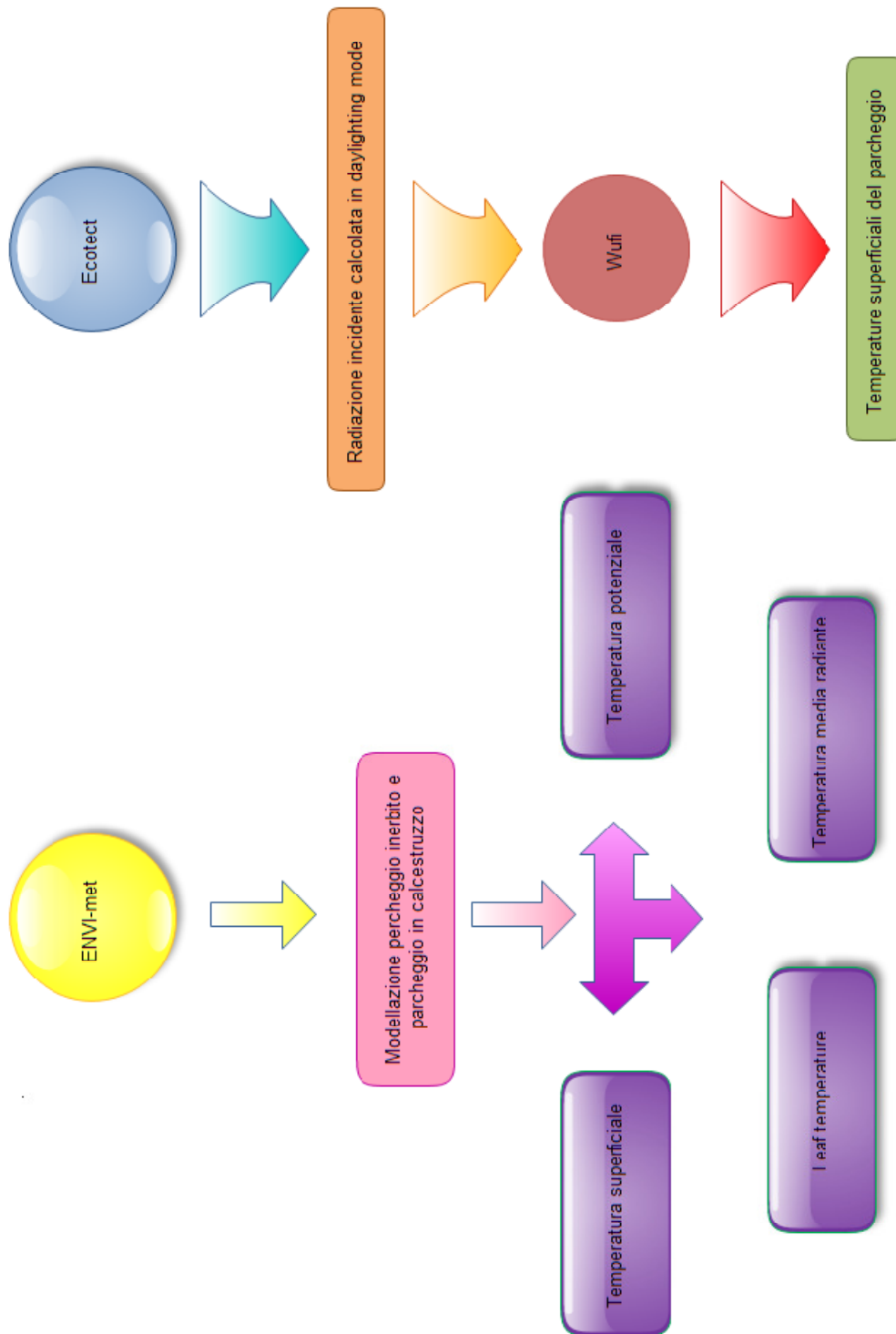


Figura 21: struttura della tesi, diagramma di flusso

4 CALCOLO DELLA RADIAZIONE INCIDENTE SULL'AREA DI INTERVENTO

4.1 *La modellazione dell'area*

Sulla base del progetto preliminare sviluppato e delle indagini climatiche effettuate è stata effettuata, innanzitutto, una modellazione dell'intera area di intervento mediante l'interfaccia grafica del software Ecotect. Come precedentemente spiegato, il programma utilizzato permette la creazione e importazione geometrica dei modelli, la contestualizzazione geografica, l'integrazione climatica e la caratterizzazione tecnologica dell'edificio. Tramite l'interfaccia grafica del software si è modellata l'intera area di intervento specificando i materiali, l'orientamento dell'edificio e la posizione geografica del sito.

Per considerare tutte le riflessioni agenti nell'area di intervento, data la complessità morfologica del sito e la presenza del mare, si è costruito un modello più grande rispetto all'area di intervento. Nello specifico, si è deciso di aumentare l'area originale di 300 m dal parcheggio in tutte le direzioni tranne lungo la collina per valutare la distribuzione della radiazione. Il parcheggio, anima dell'analisi, è stato modellato nel dettaglio considerando le superfici inclinate con pendenze del 6%, le superfici verdi e le superfici in calcestruzzo, le grate di areazione e le alberature.

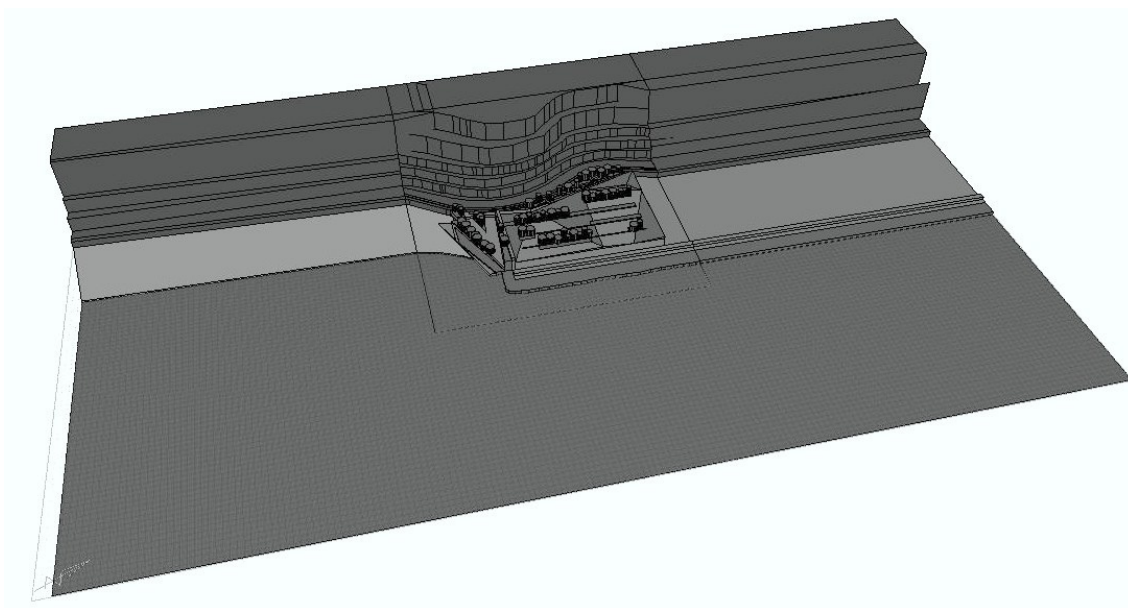


Figura 22: planimetria generale, modellazione tridimensionale tramite il software Ecotect

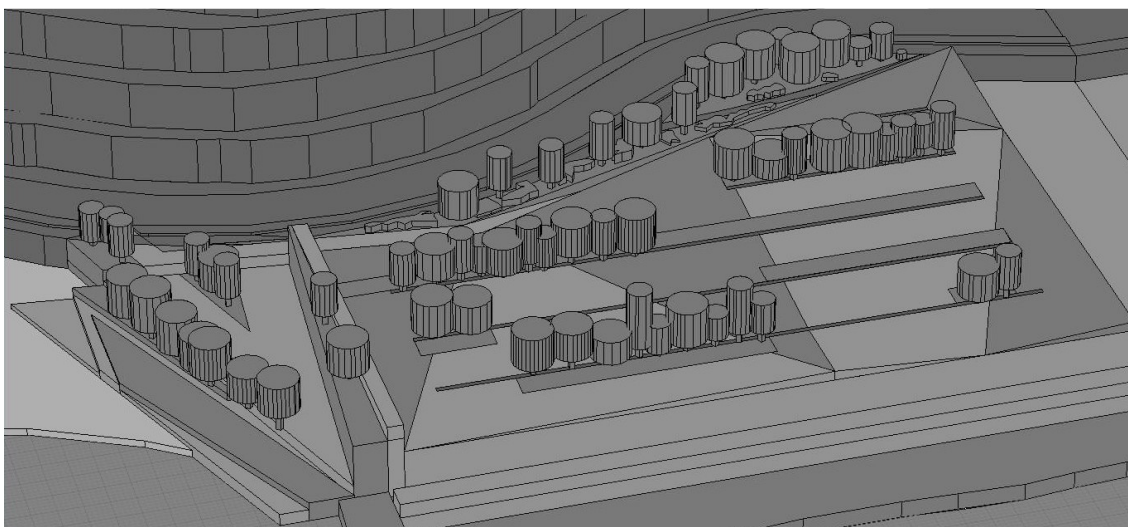


Figura 23: parcheggio, modellazione tridimensionale tramite il software Ecotect

Il modello è stato orientato secondo le mappe catastali fornite dal comune di Bergeggi; i dati climatici, invece, sono stati reperiti dal sito del software EnergyPlus (www.energy.gov) e sono riferiti alla vicina città di Genova. Successivamente si sono assegnate le rispettive proprietà riflettenti a tutti i materiali presenti, lasciando invariati gli altri parametri in quanto ritenuti influenti agli scopi dell'analisi.

4.2 La trasmissione del calore: l'irraggiamento

La trasmissione del calore riguarda tutti quei processi nei quali una certa quantità di energia termica è trasferita da un sistema ad un altro a causa di una differenza di temperatura. Tali principi avvengono secondo i principi della termodinamica. La trasmissione del calore è un fenomeno che avviene da un corpo caldo a uno freddo, fino a che i due corpi raggiungono la stessa temperatura, quella di equilibrio termico. Il corpo caldo trasferisce a quello freddo parte della sua energia termica e il trasferimento del calore avviene per conduzione, per convezione o per irraggiamento.

Tutti i corpi solidi, liquidi o gassosi, emettono energia sotto forma di radiazioni elettromagnetiche e tale emissione aumenta con l'innalzarsi della temperatura del corpo. I corpi hanno inoltre la capacità di assorbire totalmente o parzialmente l'energia radiante incidente, per cui possiamo parlare di scambio termico per radiazione. Due corpi, a temperature diverse, posti uno di fronte all'altro scambiano calore per irraggiamento: l'energia termica fluisce dal corpo più caldo a quello più freddo con intensità proporzionale alla differenza di temperatura dei due corpi ed alle loro proprietà termofisiche, fino a quando le temperature dei due corpi si equivalgono.



Figura 24: trasferimento di calore per irraggiamento

Parametro caratteristico dell'emissione di energia di un corpo è la lunghezza d'onda dell'energia emessa. Il campo di variazione di tale parametro per le radiazioni termiche è compreso tra 0.1 μm e 100 μm ed abbraccia il campo del visibile, compreso tra 0.4 e 0.7 μm e parte del campo dell'ultravioletto e dell'infrarosso

Il trasferimento per irraggiamento avviene mediante emissione e conseguente assorbimento di radiazione elettromagnetica. A differenza delle altre due modalità di scambio termico, l'irraggiamento non richiede la presenza di un mezzo perché vi sia trasmissione di energia. La radiazione termica incidente su un corpo può essere riflessa, trasmessa, assorbita e inoltre il corpo stesso emette comunque radiazione in virtù dell'agitazione termica molecolare.

Si definiscono:

$$\rho = \frac{G_{riflessa}}{G_{incidente}} \quad (5.1)$$

$$\alpha = \frac{G_{assorbita}}{G_{incidente}} \quad (5.2)$$

$$\tau = \frac{G_{trasmessa}}{G_{incidente}} \quad (5.3)$$

Dove:

- G = energia radiante incidente [W];
- ρ = coefficiente di riflessione o riflettenza totale [ad];
- α = coefficiente di assorbimento o assorbanza totale [ad];
- τ = coefficiente di trasmissione o trasmittanza totale [ad].

Per il principio di conservazione dell'energia, inoltre, vale:

$$G_{trasmessa} + G_{assorbita} + G_{riflessa} = G_{incidente} \quad (5.4)$$

Si ottiene quindi:

$$\rho_{\lambda} + \alpha_{\lambda} + \tau_{\lambda} = 1 \quad (5.5)$$

Se ci si riferisce ad una radiazione monocromatica e i coefficienti α , τ , ρ non dipendono dalla lunghezza d'onda, il corpo viene definito grigio e la dipendenza da λ viene a mancare. Per cui si può scrivere:

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (5.6)$$

4.3 La riflettenza dei materiali utilizzati

Per quanto riguarda gli alberi, l'erba, il calcestruzzo e l'asfalto, si sono reperite inizialmente le proprietà spettrali, espresse in percentuale di riflettenza in funzione della lunghezza d'onda, dal sito della Nasa (www.nasa.gov), dopodiché si è integrato tra 302 e 2500 nm (dominio ottico riflessivo) e si è trovato il coefficiente d'albedo (ρ). Si riportano successivamente i risultati e il grafico dei valori spettrali.

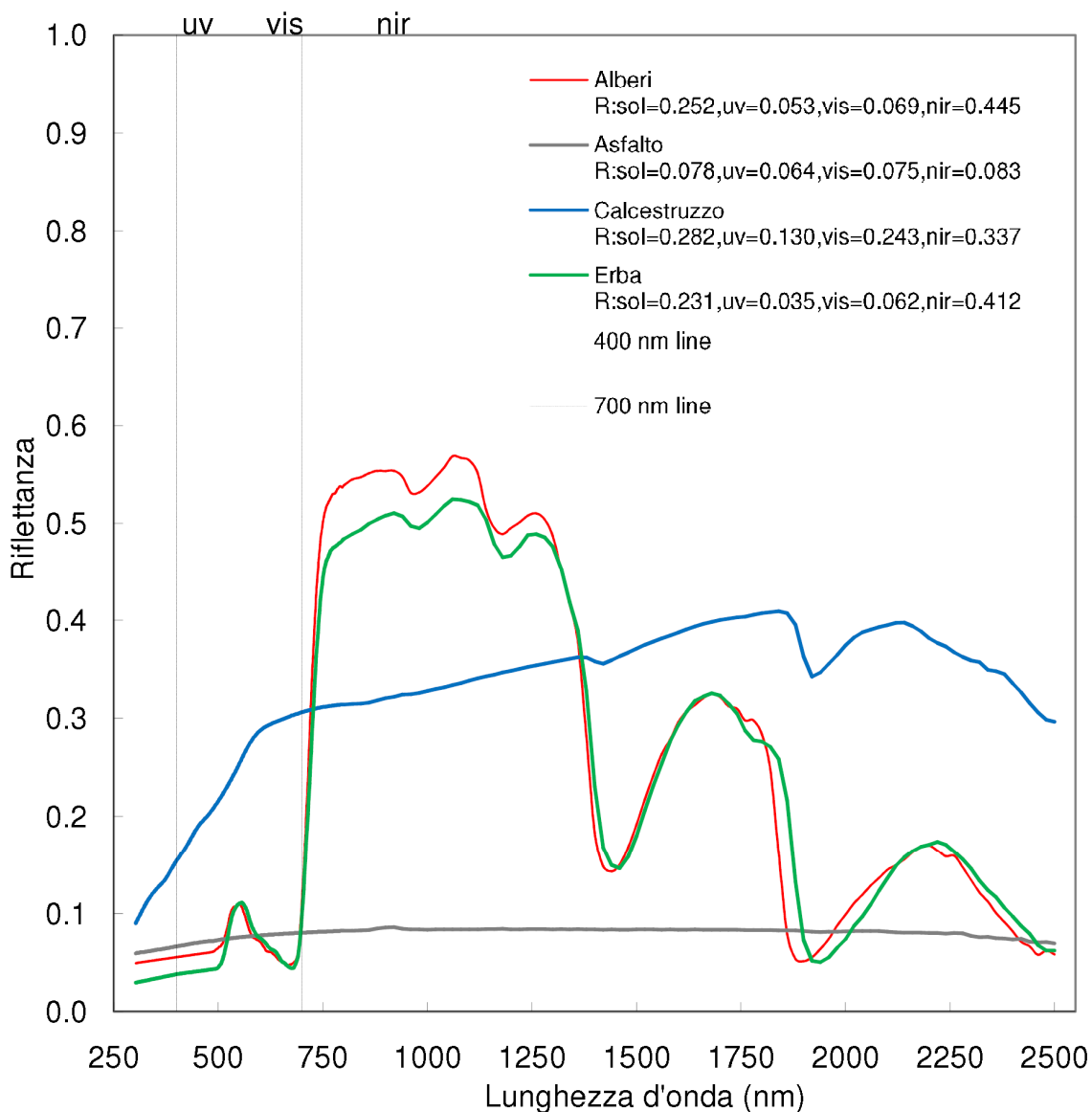


Figura 25: proprietà spettrali materiali

Dove:

- sol = 300 - 2500 nm;
- uv = 300 - 400 nm;
- vis = 400 - 700 nm;
- nir = 700 - 2500 nm.

Tabella 4: coefficienti di albedo calcolati mediante le proprietà spettrali dei materiali

Oggetto	Albedo
Erba	0.231
Calcestruzzo	0.282
Alberi	0.252
Asfalto	0.078

Riguardo agli altri elementi presenti nel modello, quali: sabbia, acqua di mare, vegetazione mediterranea, scogli, grate metalliche, non avendo a disposizione i valori spettrali (ovvero la riflettanza in funzione della lunghezza d'onda), si sono utilizzati dei valori medi trovati in alcuni documenti attendibili.

Tabella 5: coefficienti di albedo

Oggetto	Albedo	Fonte
Sabbia	0.450	Levinson & Akbari (2002)
Scogli	0.200	UNI 8477
Macchia mediterranea (arbusti)	0.150	UNI 8477
Acqua di mare	0.035	J. Graham Cogley (1979)
Griglia metallica	0.126	Calcolata da una griglia in acciaio zincato di dimensioni 420 x 420 x 30 mm e peso 6.17 Kg

4.4 L'analisi

L'analisi effettuata mediante il software Ecotect è rivolta al calcolo della radiazione incidente oraria nelle varie zone del parcheggio. Per ricavare tale dato si è effettuato un calcolo "solare", ovvero un'analisi dei livelli di insolazione. Si è utilizzato come giorno di riferimento il 18 luglio (giorno con il più elevato valore di radiazione, dall'analisi climatica) e si sono effettuate undici analisi della durata di un'ora, dalle 06.00 alle 17.00. Dal calcolo effettuato si ricavano i valori medi orari della radiazione totale incidente, della radiazione diretta e diffusa e i valori di radiazione incidente in ogni punto del parcheggio. Ai fini dell'analisi, l'area è stata discretizzata in celle da circa 5 m x 5 m, costituenti una griglia da 502 nodi (fig.25) posta alla quota del parcheggio (12 m sul livello del mare).

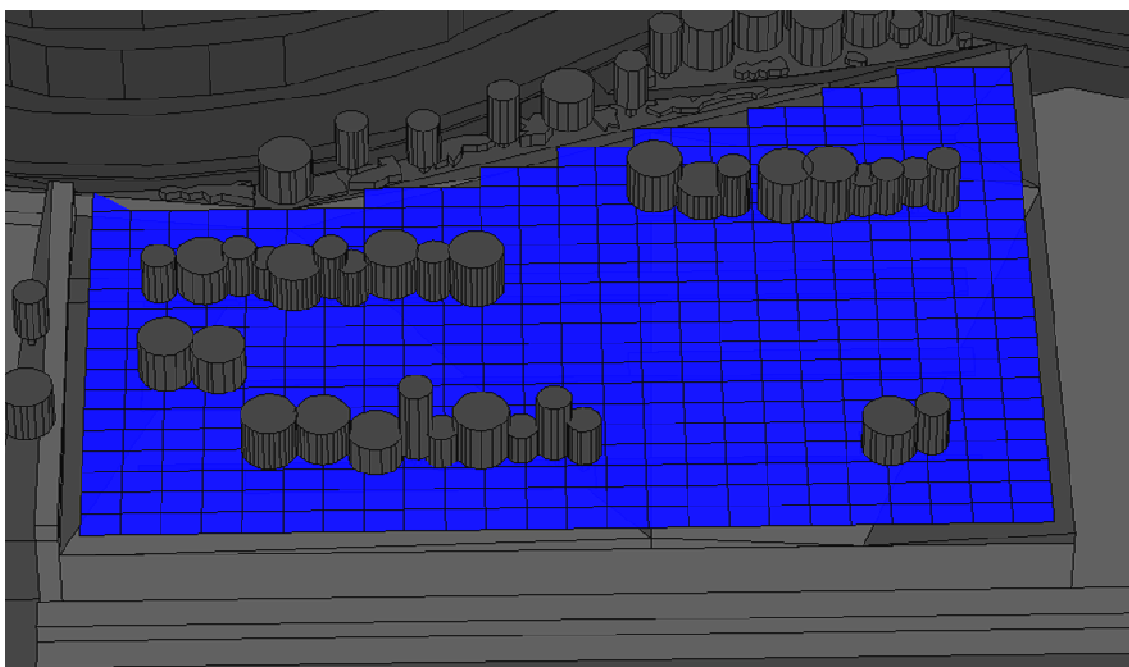


Figura 26: griglia utilizzata per l'analisi in Ecotect

Per ogni ora presa in considerazione nel calcolo, si riportano i risultati complessivi dall'analisi (tabella 6), divisi in: radiazione media totale, radiazione media diretta, radiazione media diffusa. Si evidenzia che l'ora in cui la radiazione è maggiore è compresa tra le ore 10.00 e le 11.00. Il risultato è coerente con l'analisi climatica precedentemente svolta. In corrispondenza dell'ora con la radiazione totale più alta, si presenta infine la tabella riportante i valori di radiazione totale di ogni cella (tabella 7), estrapolata dai dati ricavati mediante Ecotect. La geometria della tabella riproduce fedelmente la griglia di 5 m x 5 m in cui è stato diviso il parcheggio. La tabella è stata riportata a colori per favorire un'immediata comprensione della distribuzione della radiazione sulla superficie del parcheggio; l'unità di misura dei valori all'interno della griglia è il Wh. Si riportano in allegato A le tabelle corrispondenti a tutte le ore della giornata.

Tabella 6: radiazione globale, diretta e diffusa valutate su tutta l'area di intervento

Tempo [h]		Radiazione globale, valore medio [Wh]	Radiazione diretta, valore medio [Wh]	Radiazione diffusa, valore medio [Wh]
da	a			
6.00	7.00	274.86	089.38	185.49
7.00	8.00	452.45	244.39	208.06
8.00	9.00	609.65	395.71	213.95
9.00	10.00	756.98	510.65	246.34
10.00	11.00	874.94	629.59	245.35
11.00	12.00	862.39	573.85	288.54
12.00	13.00	741.11	445.71	295.41
13.00	14.00	637.35	389.05	248.30
14.00	15.00	470.26	253.36	216.89
15.00	16.00	276.49	105.73	170.77
16.00	17.00	124.47	012.59	111.88

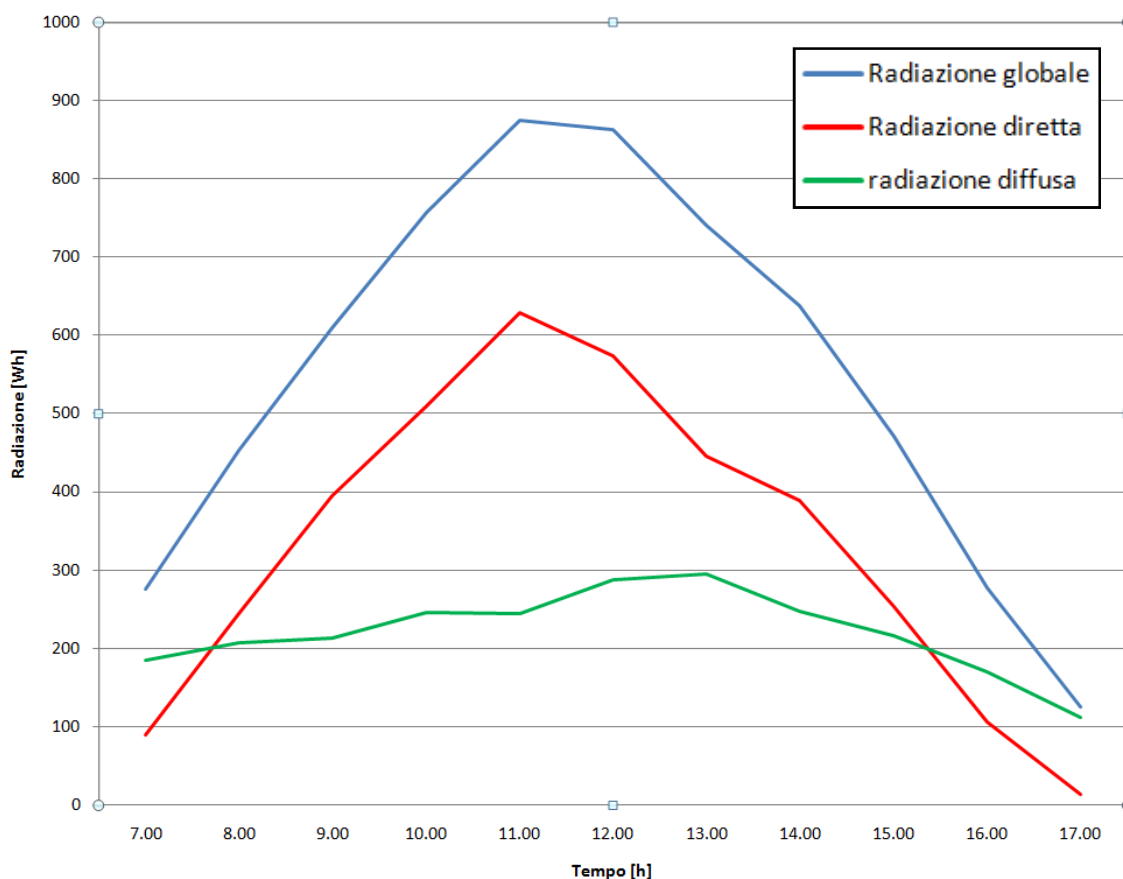


Figura 27: andamento della radiazione globale, diretta e diffusa valutate sull'area di intervento

5 CALCOLO DELLE TEMPERATURE SUPERFICIALI DEL PARCHEGGIO IN REGIME VARIABILE

5.1 Introduzione

Per il calcolo delle temperature superficiali è stato inizialmente utilizzato il software WUFI (Wärme und Feuchte instationär - Transient Heat and Moisture): un programma sviluppato da IBP, validato con dati derivanti da prove all'aperto ed in laboratorio, che consente la modellazione in regime dinamico del comportamento igrotermico di componenti edilizi esposti a variazioni di temperatura, irraggiamento solare, umidità relativa e piovosità. Il software WUFI, nello specifico, considera il trasporto accoppiato di calore e umidità (in fase liquida e in fase di vapore) in regime non-stazionario e simula il trasferimento di calore e umidità all'interno di componenti edilizi. Il software, infatti, effettua un calcolo realistico del comportamento igrotermico dell'elemento tecnico esposto a condizioni climatiche naturali poiché utilizza il metodo delle differenze finite.

5.2 Descrizione del modello di calcolo

L'equazione che descrive la conduzione in regime variabile, tenendo conto del trasporto di massa è:

$$\frac{\partial H}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + h_w \nabla \left(\frac{\delta}{\mu} \nabla(\psi p_{SAT}) \right) \quad (6.1)$$

dove:

- λ rappresenta la conducibilità del materiale umido [$\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$];
- T è la temperatura [K];
- p_{SAT} è la pressione di vapore saturo [Pa];
- ψ è l'umidità relativa [-];
- μ è il fattore di resistenza alla diffusione del vapore del materiale secco [-];
- δ è il coefficiente di diffusione del vapor d'acqua dell'aria [$\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-1}\text{Pa}^{-1}$].

L'equazione che descrive il trasporto di massa, in regime variabile, tenendo conto dello scambio termico é:

$$\frac{\partial W}{\partial \psi} \frac{\partial \psi}{\partial t} = \nabla \left(D_\psi \nabla \psi + \frac{\delta}{\mu} \nabla(\psi p_{SAT}) \right) \quad (6.2)$$

dove:

- W è il contenuto d'acqua [kg/m^3];
- T è la temperatura [K];
- p_{SAT} è la pressione di vapore saturo [Pa];
- ψ è l'umidità relativa [-];
- μ è il fattore di resistenza alla diffusione del vapore del materiale secco [-];
- δ è il coefficiente di diffusione del vapor d'acqua dell'aria [$\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-1}\text{Pa}^{-1}$];

- D_v è il coefficiente di conduzione liquida (determinato sperimentalmente) [kg/ms].

In generale un materiale edilizio si definisce secco quando non contiene acqua o solo acqua legata chimicamente. Quando un materiale non igroscopico è a contatto con l'aria umida, infatti, resta secco; se invece è igroscopico adsorbe molecole d'acqua sulla superficie interna dei pori, grazie alle forze di Van Der Waals, fino al raggiungimento delle condizioni di equilibrio con l'atmosfera. Per valutare le prestazioni energetiche di un componente edilizio, quindi, è necessario considerare il meccanismo combinato di trasporto di energia termica ed di trasporto di massa.

Per il calcolo della pressione di saturazione esistono varie formulazioni. Qui si sceglie di riferirsi alla normativa UNI EN ISO 13788: 2003:

per $\vartheta \geq 0^\circ\text{C}$

$$p_{SAT} = 610.5 \exp\left\{\frac{17.269 \vartheta}{237.3 + \vartheta}\right\} \quad (6.3)$$

per $\vartheta < 0^\circ\text{C}$

$$p_{SAT} = 610.5 \exp\left\{\frac{21.875 \vartheta}{265.5 + \vartheta}\right\} \quad (6.4)$$

dove:

- ϑ rappresenta la temperatura dell'aria (all'interno dei pori del materiale) [$^\circ\text{C}$].

5.4 I componenti analizzati

Il parcheggio oggetto dell'analisi è costituito da zone in calcestruzzo, aree inerbite e superfici alberate; durante la progettazione preliminare si è effettuato un predimensionamento strutturale e si sono definiti gli strati delle sezioni correnti. Il calcolo strutturale è stato effettuato dall'ingegnere A. Sala dello Studio Associato S.P.S.; il verde e le sezioni correnti, invece, sono stati curati dalla Peverelli s.r.l.

5.4.1 Il parcheggio in calcestruzzo

Le superfici in calcestruzzo occupano poco meno della metà dell'area totale del parcheggio e sono costituite da un massetto di calcestruzzo armato gettato sopra uno strato di riempimento in terreno costipato. La sezione corrente, di spessore totale 70 cm, è sostenuta da uno strato strutturale in cemento armato gettato in opera

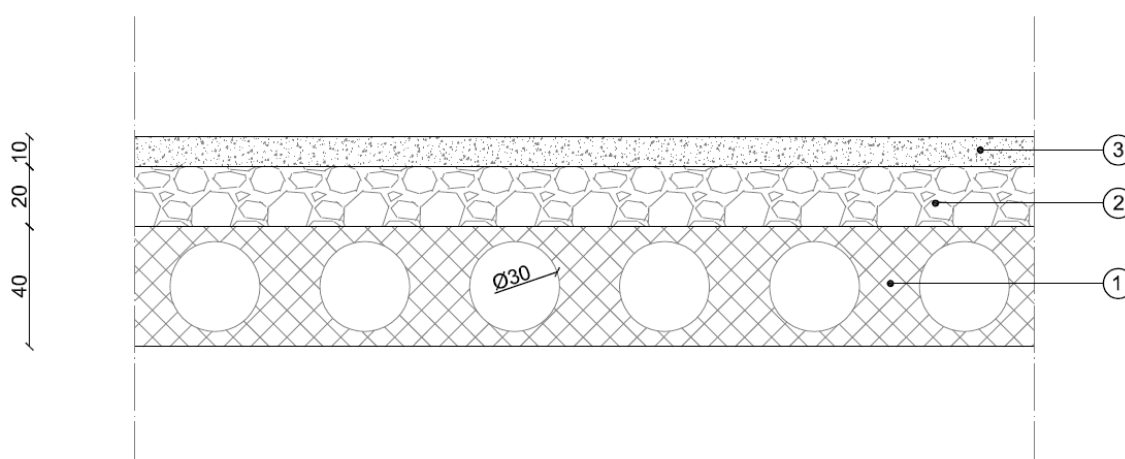


Figura 29: sezione corrente delle superfici in calcestruzzo

Dove:

1. struttura in cemento armato gettata in opera, spessore 40 cm, alleggerita da sfere in material plastico, $\Phi = 30$ cm. In corrispondenza dei pilastri e dei cambi di pendenza sarà invece predisposta una soletta piena;
2. Strato di riempimento ben costipato in terra e ghiaia di risulta, spessore 20 cm;
3. Strato di ripartizione dei carichi in calcestruzzo armato con rete elettrosaldata, spessore 10 cm.

Sono stati impiegati i seguenti materiali con le rispettive proprietà, ordinati dall'interno all'esterno:

Tabella 8: coefficienti di base dei materiali

Nome strato	Calcestruzzo C35/45	Terreno	Massetto in cemento
Spessore [m]	0.4	0.2	0.1
Densità a secco [kg/m^3]	2220.0	1800.0	1890.0
Porosità [m^3/m^3]	0.18	0.3333	0.2
Capacità termica a secco [J/KgK]	850.0	1000.0	850.0
Conducibilità termica a secco, 10°C [W/mK]	1.6	2.0	1.6
Coefficiente di resistenza della diffusione di vapore acqueo [-]	248.0	50.0	58.0
Umidità cantiere tipica [Kg/m^3]	147.0	150.0	168.0

5.4.2 Il parcheggio inerbito

Si è esaminata successivamente la sezione corrente delle superfici del parcheggio coperte di erba, che occupano più della metà dell'area del parcheggio. L'erba, seminata nello strato culturale, è protetta da un grigliato in materiale plastico posato su un strato in sabbia.

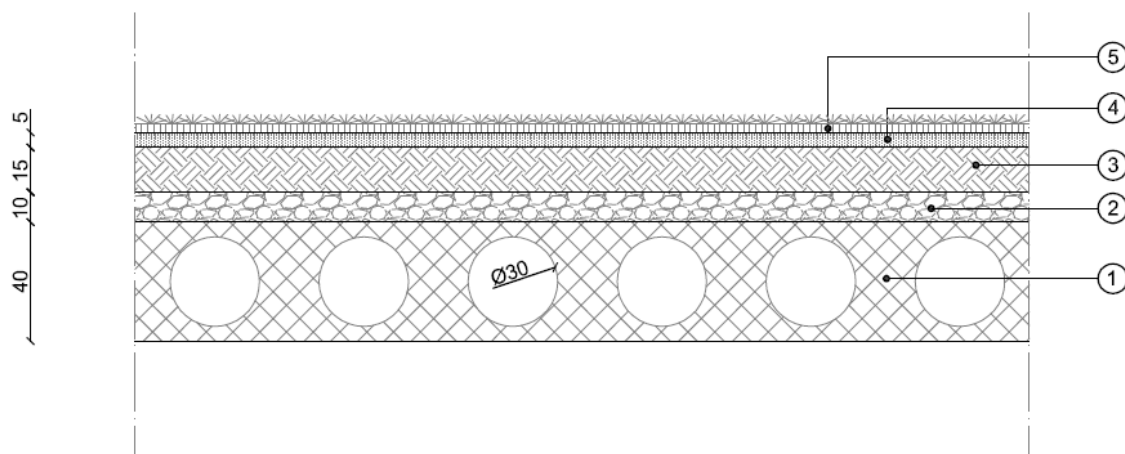


Figura 30: sezione corrente delle superfici inerbite

Dove:

1. struttura in cemento armato gettata in opera, spessore 40 cm, alleggerita da sfere in material plastico, $\Phi = 30$ cm. In corrispondenza dei pilastri e dei cambi di pendenza sarà invece predisposta una soletta piena;
2. strato drenante in misto di cava rullato, spessore 10 cm;
3. strato di allettamento in terra e ghiaia, spessore 15 cm;
4. letto di sabbia, spessore 5 cm;
5. grigliato in materiale plastico.

Si sono impiegati i seguenti materiali con le rispettive proprietà, ordinati dall'interno all'esterno:

Tabella 9: coefficienti di base dei materiali

Nome strato	Calcestruzzo C35/45	Terreno, sabbia e roccia
Spessore [m]	0.4	0.3
Densità a secco [kg/m^3]	2220.0	1800.0
Porosità [m^3/m^3]	0.18	0.3333
Capacità termica a secco [J/KgK]	850.0	1000.0
Conducibilità termica a secco, 10°C [W/mK]	1.6	2.0
Coefficiente di resistenza della diffusione di vapore acqueo [-]	248.0	50.0
Umidità cantiere tipica [Kg/m^3]	147.0	150.0

5.4.3 Le superfici alberate

Sono state, infine, analizzate le superfici alberate. Si tratta di zone costituite da vere e proprie vasche di dimensione e altezza sufficienti ad ospitare piante ad alto fusto. Queste vasche verranno poste in opera sullo strato drenante, avendo cura di separarle con uno strato ripartitore dei pesi. La stessa vasca disporrà all'interno di uno strato drenante con relativi scarichi e di un filtro separatore.

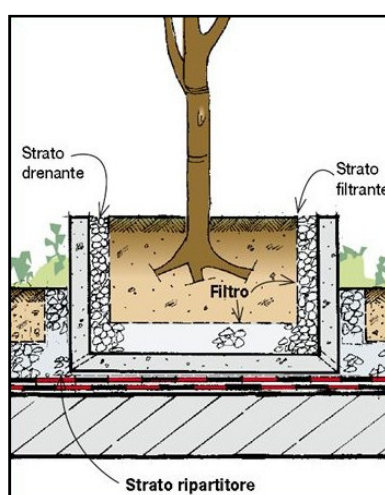


Figura 31: vasche per aree alberate

Per l'analisi in questione, la sezione corrente può essere suddivisa nei seguenti strati, ordinati dall'interno all'esterno:

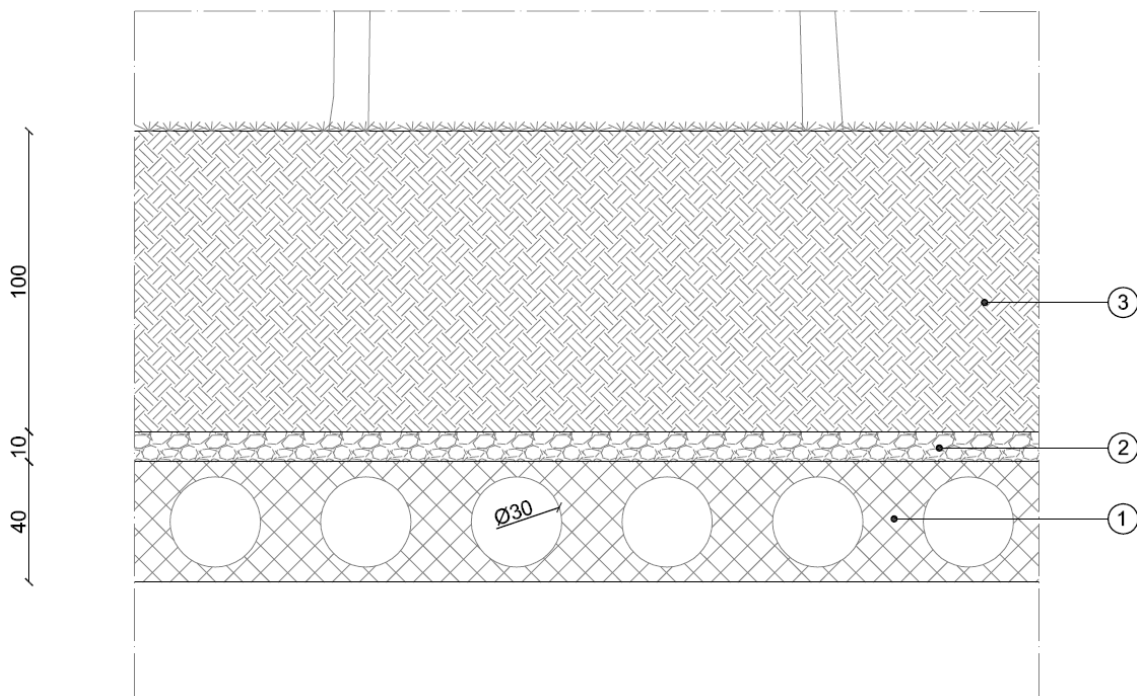


Figura 32: sezione corrente delle superfici alberate

Dove:

1. struttura in cemento armato gettata in opera, spessore 40 cm, alleggerita da sfere in material plastico, $\Phi = 30$ cm. In corrispondenza dei pilastri e dei cambi di pendenza sarà invece predisposta una soletta piena;
2. strato drenante in misto di cava rullato, spessore 10 cm;
3. substrato vegetale in terra e ghiaia, spessore 100 cm.

Sono stati impiegati i seguenti materiali con le rispettive proprietà, ordinati dall'interno all'esterno:

Tabella 10: coefficienti di base dei materiali

Nome strato	Calcestruzzo C35/45	Terreno
Spessore [m]	0.4	1.1
Densità a secco [kg/m^3]	2220.0	1800.0
Porosità [m^3/m^3]	0.18	0.3333
Capacità termica a secco [J/KgK]	850.0	1000.0
Conducibilità termica a secco, 10°C [W/mK]	1.6	2.0
Coefficiente di resistenza della diffusione di vapore acqueo [-]	248.0	50.0
Umidità cantiere tipica [Kg/m^3]	147.0	150.0

5.5 Risultati dell'analisi

Si sono analizzate con il software WUFI tutte le precedenti sezioni correnti con i rispettivi materiali. Le analisi sono state effettuate ad intervalli orari, a partire dall' 1 ottobre 2011, per una durata complessiva di tre anni; i dati climatici, invece, sono stati reperiti dal sito del software EnergyPlus (www.energy.gov) e sono riferiti alla vicina città di Genova. Si sono calcolate le temperature superficiali esterne della sezione corrente, ovvero le temperature superficiali del parcheggio.

Si sono svolte due analisi per ogni sezione corrente utilizzando le condizioni climatiche di Genova per la prima ed le condizioni climatiche modificate con i dati ricavati in Ecotect per la seconda. Si è creato, infatti, un file climatico ad hoc sostituendo la radiazione incidente presente la radiazione precedentemente calcolata mediante il software Ecotect. Questo confronto tra temperature superficiali risulta particolare interessante poiché evidenzia l'incidenza dell'ombreggiamento della vegetazione nell'area di intervento. Attraverso Ecotect, infatti, si è calcolato il valore di radiazione incidente oraria, tramite una media di tutta la superficie del parcheggio.

Il grafico in fig. 30 è ricavato dall'analisi delle sezioni in calcestruzzo con le condizioni climatiche di Genova e rappresenta la temperatura superficiale che avrebbe un parcheggio in calcestruzzo senza ombreggiamenti.

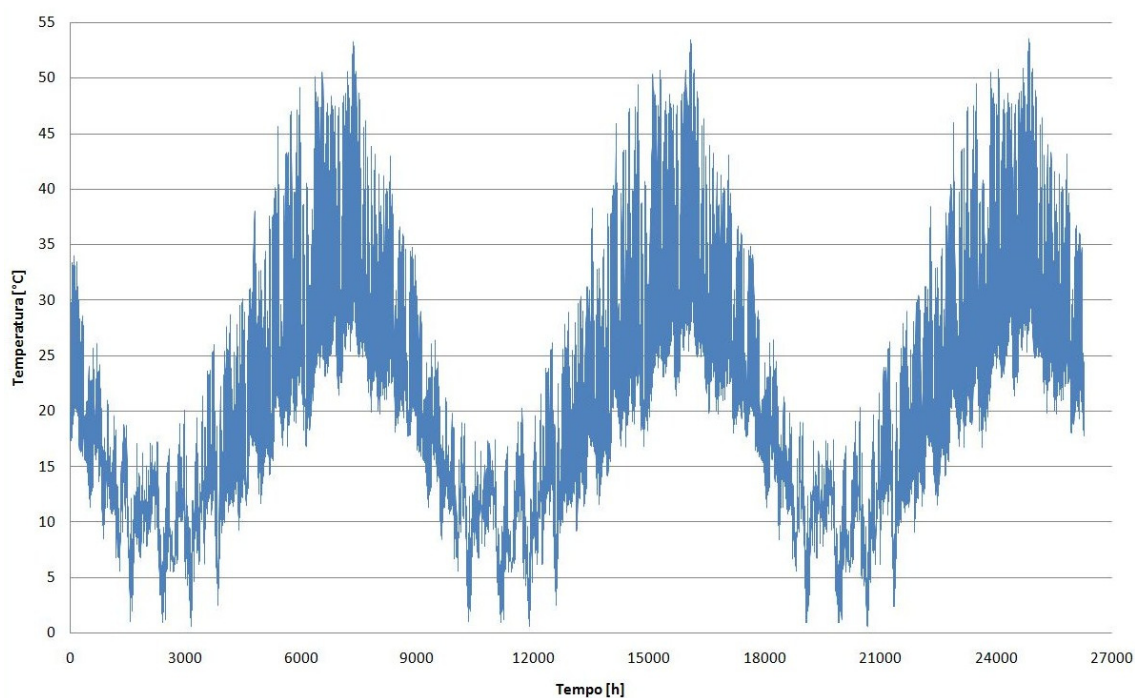


Figura 30: temperatura superficiale delle superfici in cemento, condizioni climatiche di Genova

MAX	53.85
MIN	0.55
MEDIA	20.22
DEV.ST	10.27

Il grafico successivo, invece, è il risultato dell'analisi della sezione corrente delle superfici in calcestruzzo con le condizioni climatiche modificate. Il grafico illustra l'andamento delle temperature superficiali medie delle aree in calcestruzzo considerando gli ombreggiamenti prodotti dalla vegetazione.

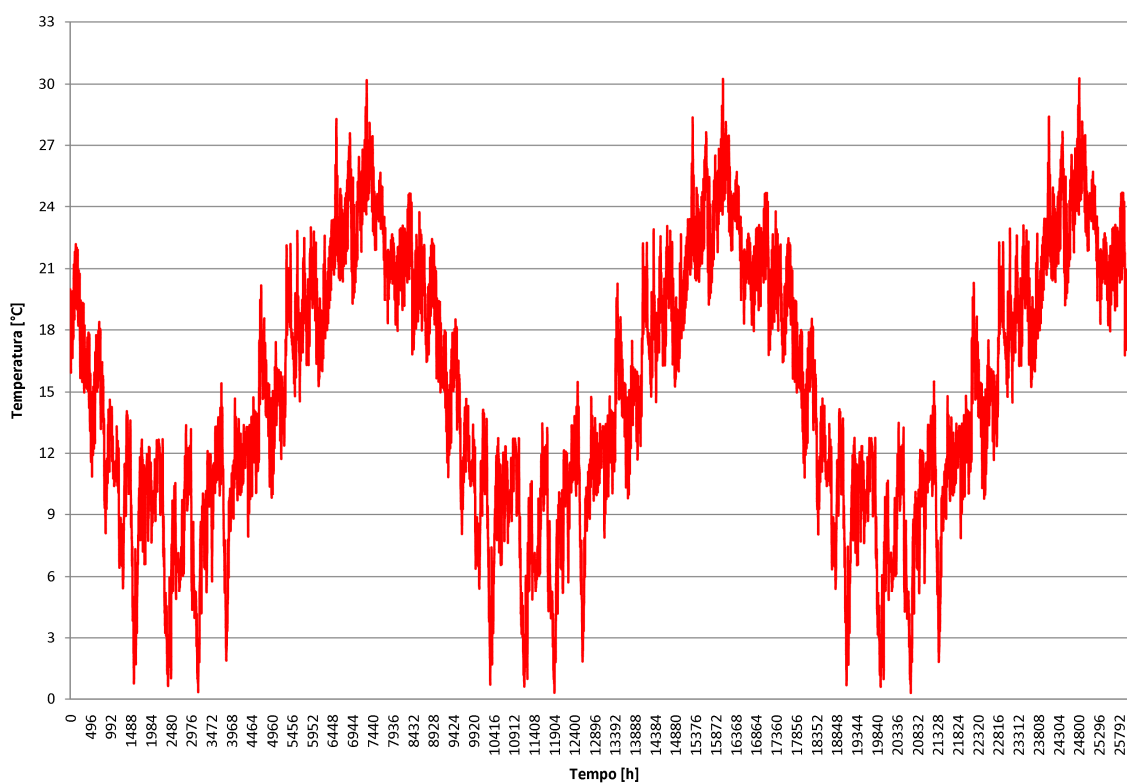


Figura 33: temperatura superficiale delle superfici in cemento, condizioni climatiche modificate

MAX	30.28
MIN	00.30
MEDIA	15.20
DEV. ST.	06.20

Dai grafici precedenti si nota una differenza di 23.57°C tra le temperature massime (53.85°C il primo caso e 30.28 °C il secondo) e di circa 5.02°C tra le temperature medie (20.22°C il primo caso e 15.20°C il secondo). Questa differenza di temperatura rappresenta l'incidenza dell'ombreggiamento della vegetazione sull'e superfici in calcestruzzo del parcheggio.

Si è seguito lo stesso procedimento per l'analisi delle sezioni correnti del parcheggio inerbito, calcolando le temperature superficiali con due condizioni climatiche diverse.

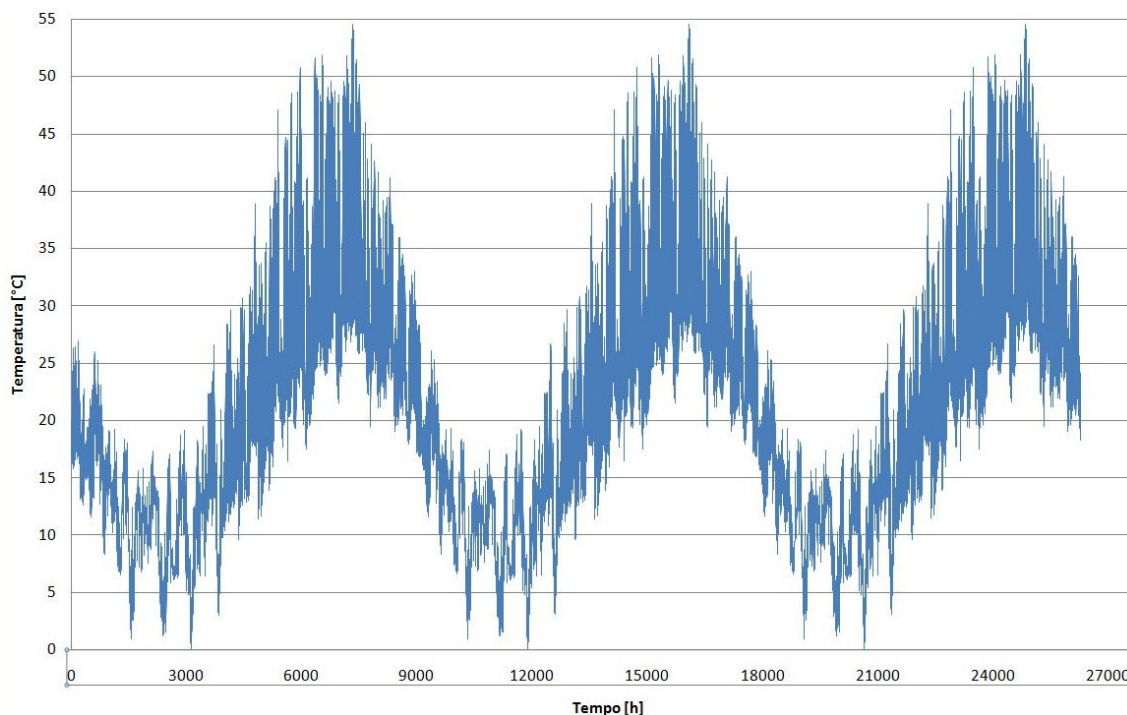


Figura 34: temperatura superficiale delle superfici inerbite, condizioni climatiche di Genova

MAX	55.08
MIN	0.49
MEDIA	20.57
DEV.ST	10.50

Il grafico in fig.31 riporta le temperature superficiali delle superfici verdi in un parcheggio senza ombreggiamenti prodotti da vegetazione o da eventuali tende. Si nota, innanzitutto, che le temperature di picco delle superfici inerbite (55.08°C) sono più alte di quelle delle aree in calcestruzzo (53.85°C). Questo risultato è causato dal fatto che l'albedo del calcestruzzo ($\rho = 0.282$) è maggiore dell'albedo dell'erba ($\rho = 0.231$), di conseguenza, dato che entrambi sono opachi ($\tau = 0$), il coefficiente di assorbimento del calcestruzzo ($\alpha = 0,718$) è minore di quello

dell'erba ($\alpha = 0,769$). Il software WUFI, inoltre, non tiene conto del fenomeno dell'evapotraspirazione, grazie al quale nella vegetazione si ha un notevole abbassamento di temperatura.

Succivamente si riporta il grafico della temperatura superficiale delle superfici inerbite con le condizioni climatiche modificate.

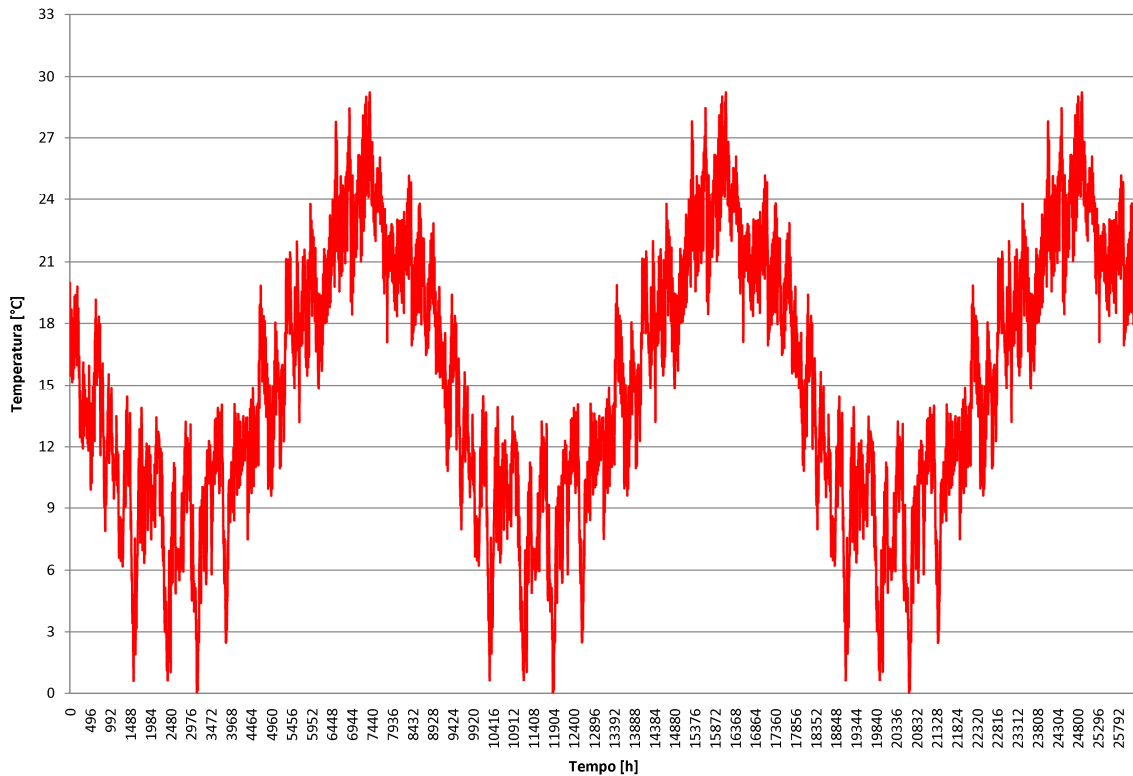


Figura 35: temperatura superficiale delle superfici inerbite, condizioni climatiche modificate

MAX	29.24
MIN	-0.18
MEDIA	15.16
DAV.ST	6.21

Anche in questo caso si nota un notevole abbassamento della temperatura grazie agli ombreggiamenti. La temperatura massima, infatti, è pari a 55,08 °C nel primo modello, mentre ha un valore di 29,24 °C nel secondo caso; una differenza sostanziale (maggiore di quella registrata nelle superfici in calcestruzzo) pari a 25,84 °C. La differenza tra le temperature medie, invece, è pari a 5,41 °C. Dal confronto tra le temperature delle superfici analizzate con il

file climatico modificato, si evidenzia infine un abbassamento del valore di picco (29.24 °C per le aree inerbite e circa 30.28 °C nelle aree in calcestruzzo).

Si riportano infine i grafici delle superfici alberate, analizzate con i modelli climatici precedentemente descritti.

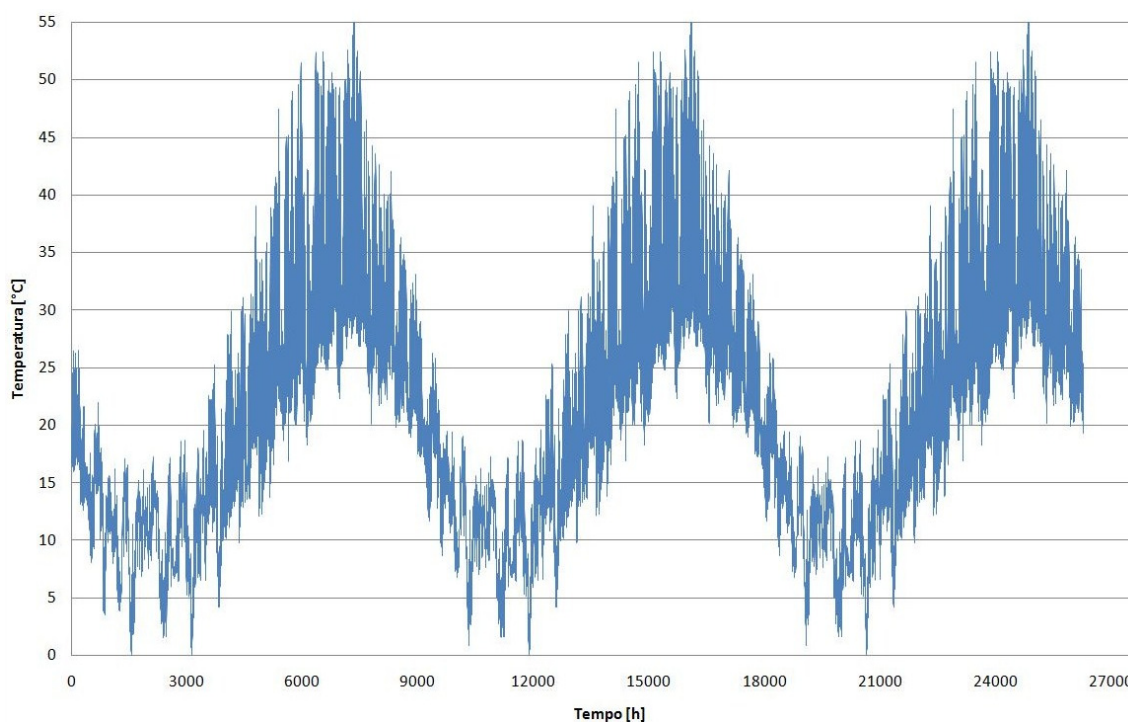


Figura 36: temperatura superficiale delle superfici alberate, condizioni climatiche di Genova

MAX	55.92
MIN	00.72
MEDIA	20.82
DEV.ST	10.82

Anche in questo caso le temperature massima e media sono elevate a causa delle ragioni esposte precedentemente riguardo alle superfici inerbite. Il coefficiente di assorbimento considerato per le superfici alberate infatti è uguale a quello utilizzato per l'erba, pari a $\alpha = 0,769$.

Successivamente si presenta il grafico rappresentante l'evoluzione della temperatura superficiale delle aree verdi considerando gli ombreggiamenti. Vale la pena ricordare che sono

stati considerati gli ombreggiamenti “medi” su tutta l'area del parcheggio, non solo in corrispondenza delle superfici alberate. Le aree alberate, sostanzialmente, sono state considerate allo stesso modo delle superfici inerbite per quanto riguarda ombreggiamenti e albedo.

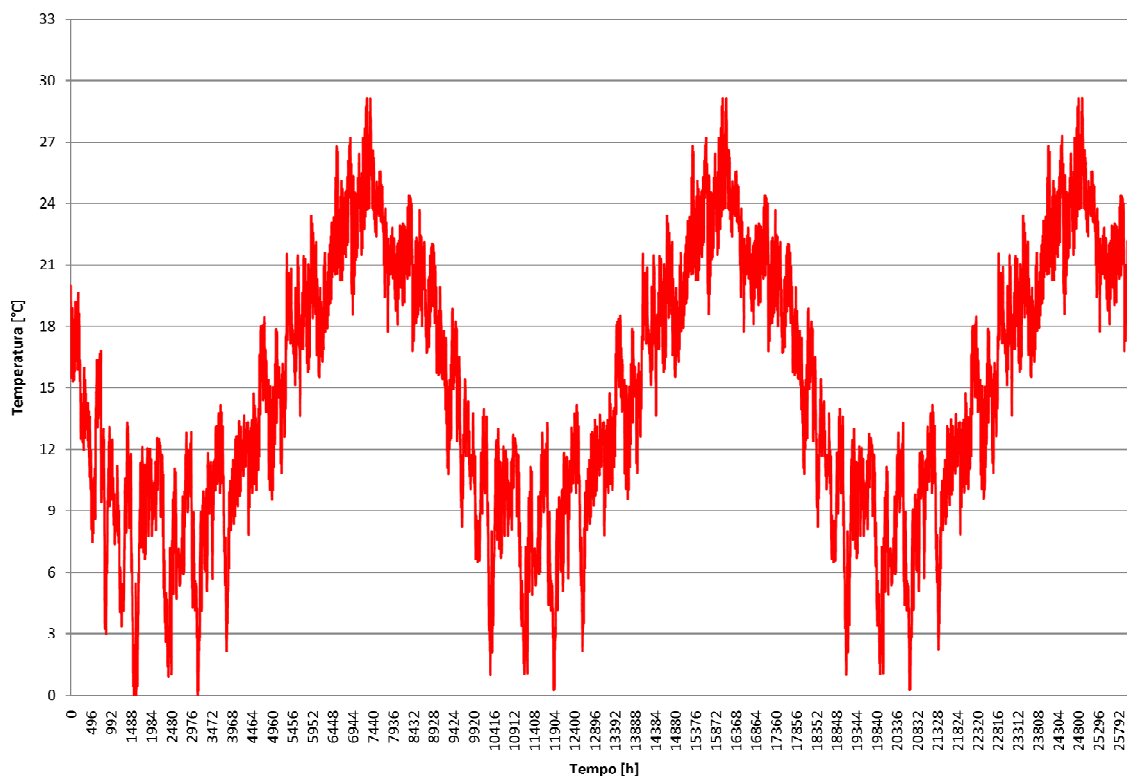


Figura 37: temperatura superficiale delle superfici alberate, condizioni climatiche modificate

MAX	29.12
MIN	00.06
MEDIA	14.99
DEV.ST	06.29

Anche nel caso delle superfici alberate ci sono forti differenze tra le temperature massime dei due modelli. La differenza tra le temperature massime dei due modelli è pari a 26 °C, una via di mezzo tra le aree in calcestruzzo e le superfici inerbite; la differenza di 5,80 °C tra le temperature medie conferma invece la tendenza riscontrata nei precedenti casi.

5.6 Conclusioni delle analisi igrotermiche

Dall'analisi effettuata con il software WUFI si sono ricavate le temperature superficiali delle varie superfici del parcheggio analizzato. Lo studio è stato effettuato con due modelli climatici per valutare l'incidenza dell'ombreggiamento prodotto dalla vegetazione nell'intervento.

Per quanto riguarda le superfici in calcestruzzo si evidenzia una temperatura massima di 53.85 °C nel caso di un parcheggio privo di ombreggiamenti e di 30.28 °C considerando l'ombreggiamento della vegetazione; le temperature medie, invece sono pari a 20.22 °C nel primo caso e di 15.20 °C nel secondo caso.

Nel parcheggio inerbito, si registrano temperature massime pari a 55.08 °C nel caso di un parcheggio privo di ombreggiamenti e di 29.24 °C con l'ombreggiamento della vegetazione; le temperature medie, invece sono pari a 20.57 °C nel primo caso e di 15.16 °C nel secondo caso.

Le aree alberate, considerate allo stesso modo delle superfici inerbite per quanto riguarda ombreggiamenti e albedo, mostrano temperature massime di 55.92 °C nel caso di un parcheggio privo di ombreggiamenti e di 29.12 °C tenendo conto dell'ombreggiamento della vegetazione; le temperature medie, invece sono pari a 20.82 °C nel primo caso e di 14.99 °C nel secondo caso.

Le analisi effettuate nelle superfici con vegetazione, tuttavia, non tengono conto del fenomeno dell'evapotraspirazione. L'evapotraspirazione è un fenomeno che considera l'abbassamento di temperatura dovuto alla quantità di acqua che dal terreno passa allo stato di vapore per effetto congiunto della traspirazione, attraverso le piante, e dell'evaporazione, attraverso il terreno. Sia la traspirazione, sia l'evaporazione, infatti, sono processi che assorbono calore dall'ambiente.

Si può quantificare, tuttavia, l'incidenza dell'ombreggiamento della vegetazione nell'intervento. Si riscontra infatti una differenza di circa 5 °C tra le temperature superficiali medie annuali e una differenza di circa 25 °C tra le temperature superficiali massime.

6 CALCOLO DELLE TEMPERATURE SUPERFICIALI DEL PARCHEGGIO TRAMITE IL SOFTWARE ENVI-MET

6.1 Introduzione

Per rendere più accurato il calcolo delle temperature superficiali delle aree con vegetazione effettuato con il software Wufi, considerando il fenomeno dell'evapotraspirazione, si è successivamente utilizzato il programma Envi-met: un software di simulazione ambientale e microclimatica a modello tridimensionale. Il programma in questione è in grado di simulare e riprodurre il comportamento micro-climatico e fisico di aree urbane e rurali. La modellazione implementa e studia le interazioni fra edifici, superfici, vegetazione, flussi d'aria ed energia di una porzione di area urbana sollecitata dalle condizioni climatiche di contesto geografico. Il software è inoltre in grado di simulare fattori relativi alla qualità dell'aria. Il programma è simulato microaree urbane con una risoluzione variabile fra gli 0.5 e i 10 metri e per un periodo di tempo a scelta dell'utente, con un time-step di calcolo massimo di 10 secondi. Questa combinazione di risoluzioni permette l'analisi a piccola scala delle interazioni fra edifici, superfici e vegetazione all'interno dell'area modellata. Tramite Envi-met si è modellata l'area di intervento e si è effettuata un'analisi globale dalla quale è stato possibile estrapolare la temperatura superficiale di foglia delle zone del parcheggio coperte dalla vegetazione, la temperatura media radiante e la temperatura potenziale.

6.2 La struttura del software

Envi-met è composto da diverse interfacce, ognuna delle quali è necessaria per il corretto funzionamento della simulazione o per la lettura dei dati di output. La struttura del software vede infatti tre principali componenti di input che vanno a convergere nell'interfaccia di simulazione che svolge l'analisi globale, applicando i modelli di calcolo. I risultati dei calcoli svolti sono raggruppati in numerosi e diversi file output che possono essere letti e analizzati attraverso due ulteriori interfacce di lettura.

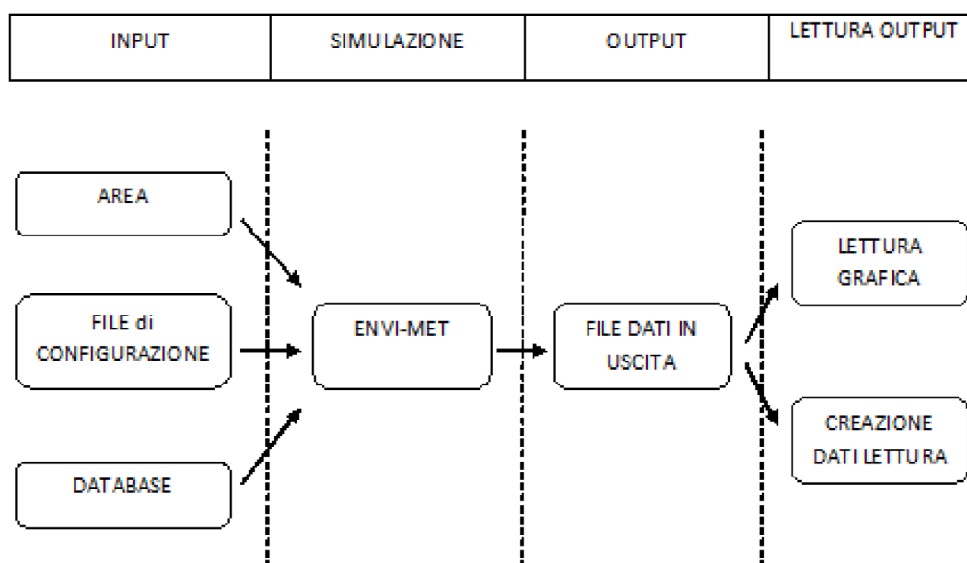


Figura 38: diagramma di flusso del software ENVI-met

6.2.1 Input

Gli input necessari per l'analisi possono essere suddivisi in tre componenti: "Area Input File", "Configuration File" e "Database". Questi tre elementi vengono importati nell'interfaccia principale che svolge la vera e propria simulazione applicando i modelli di calcolo in seguito descritti.

Il file "Area Input File" è creato attraverso l'interfaccia grafica del software e contiene principalmente i dati geometrici del modello simulato, ovvero:

- dimensione dell'area oggetto dell'analisi;
- superficie e altezza di edifici;
- dimensione di spazi verdi e tipo di vegetazione;
- tipologie di suolo;
- dimensioni di strade;
- 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.

Il "file di configurazione" contiene tutti quelli che sono i parametri iniziali di calcolo e le condizioni a contorno della simulazione, nello specifico:

- informazioni legate all'organizzazione dei file relativi alla simulazione (nome della simulazione e collegamento con la parte "Area Input File");
- dati relativi agli edifici (albedo e trasmittanza delle chiusure);
- dati relativi al suolo (albedo, temperatura e umidità relativa superficiale a diverse profondità);
- dati relativi al vento (direzione di provenienza, velocità a 10 m dal suolo, rugosità del suolo);
- data solare relativa alla simulazione;
- durata della simulazione in ore;
- ora di inizio della simulazione;
- time-step di calcolo (ovvero l'intervallo di tempo al quale il programma associa la risoluzione delle equazioni);
- eventuale presenza di nubi in cielo;
- eventuali sorgenti di gas inerti o particolato;
- modelli e condizioni di calcolo per le turbolenze dell'aria.

I "database" associati ad ogni modello di simulazione, costituito dai file precedentemente descritti, 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. Sostanzialmente, si tratta di dati legati alla tipologia specifica di piante o terreno, quali: contenuto d'acqua, conducibilità termica, caratteristiche fisiologiche delle foglie e delle radici.

6.2.2 L'interfaccia di simulazione

L'interfaccia di simulazione è la parte centrale del software in cui si associano i file di input relativi al modello e si può fare partire lo svolgimento dei calcoli. Essa non necessita di un ampio utilizzo, ma rappresenta il motore del software attraverso cui controllare l'avanzamento dei calcoli, mediante l'indicazione istantanea del tempo simulato e gli eventuali errori che portano al blocco dello svolgimento.

6.2.3 Output

Envi-met genera moltissimi output e li suddivide in file e cartelle a seconda dei datafield cui sono associati i dati. Alcuni sono file di testo leggibili ed importabili in programmi di calcolo per eventuali analisi, altri sono file non codificabili se non mediante le interfacce allegate al software. La prima interfaccia è grafica e selezionando i datafield è possibile avere una rappresentazione in scala cromatica, con isolinee o con rappresentazione vettoriale del dato; la seconda permette invece di "tagliare" il modello tridimensionale con piani orizzontali o verticali ed estrarre solo i dati relativi alla sezione su di un file di testo importabile in programmi di calcolo. I programmi per visualizzare i stati di output verranno descritti in dettaglio in seguito.

6.3 Modelli di calcolo

Per svolgere la simulazione il software implementa dei modelli fisici teorici tradotti in sistemi di equazioni molto complessi, solitamente non lineari e li risolve attraverso modelli matematici. Tali sistemi sono molto articolati a causa della tridimensionalità del modello cui vengono applicati ed il rischio di divergenza nello svolgimento di tali calcoli è molto alto. Per questo motivo il programma ha bisogno di parametri di calcolo e di espedienti di controllo che impediscano di arrivare a punti critici nello svolgimento delle equazioni. Di seguito sono esplicitati i modelli, le ipotesi di calcolo e le condizioni iniziali che il programma applica ed i rischi di errore o divergenza che essi comportano o elidono.

6.3.1 Ipotesi di calcolo

Per modellare l'area e svolgere i calcoli associati ad equazioni di bilancio, lo spazio del modello di simulazione viene discretizzato in volumi finiti. Per questa ragione il file "Area" è costituito da celle tridimensionali scelte ed impostate in fase iniziale: le condizioni forzanti il singolo volume sono quelle calcolate per i volumi adiacenti. Il gran numero di equazioni da risolvere e la non linearità delle stesse porta a lunghi tempi di simulazione del modello e ad un grande rischio di divergenza dei parametri inseriti nei calcoli. Per risolvere questo enorme ammontare di equazioni il sistema necessita di semplificazioni e condizioni a contorno forti in grado di limitare la possibilità di divergenza, senza tuttavia rischiare di perdere informazioni importanti o precisione nei dati. Con questo fine la modellizzazione in elementi finiti avviene in modo differenziato. Le celle interne al modello prendono come condizioni a contorno i dati calcolati per i volumi adiacenti, tuttavia è necessario stabilire condizioni a contorno influenti sui bordi. Come in tutti i programmi che impiegano metodi numerici, i bordi dell'area rappresentano un problema poiché le equazioni non possono essere risolte in quei punti ed è quindi necessario imporre delle ipotesi per permettere lo svolgimento dei calcoli. Envi-met permette di scegliere tre ipotesi per le condizioni a contorno:

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

La scelta delle ipotesi relative alle condizioni a contorno è importante per l'incidenza dei bordi sui dati calcolati all'interno dell'area. Per semplicità si è deciso di applicare la prima condizione a contorno, ovvero le "Open Boundary Conditions", data la grande distanza del parcheggio dai bordi. Allo stesso fine vengono introdotte nell'area le "Nesting Grids" che rappresentano una fascia di celle attorno all'area da analizzare e per cui il programma svolge i calcoli senza

inserire i risultati nei file in uscita. Questa fascia assorbe l'incidenza delle condizioni a contorno e la scarsa attendibilità dei dati iniziali. Le condizioni a contorno e le "nesting grids" permettono anche di limitare o controllare le possibili divergenze di calcolo.

6.3.2 Modello della temperatura e dell'umidità

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

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

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

dove:

- Qh e Qq rappresentano il calore e il vapore scambiati dalla vegetazione con l'atmosfera e vengono calcolati attraverso i modelli matematici che descrivono la vegetazione. $\frac{\partial R_{n,lw}}{\partial z}$ rappresenta la divergenza della radiazione a bassa frequenza (longwave) che computa l'effetto di raffreddamento e raffrescamento legato al flusso radiativo.

6.3.3 Modello dei flussi radiativi

I flussi radiativi entranti nel modello sono necessari come condizioni al contorno e sono calcolati attraverso un modello che approssima i flussi di radiazione a bassa frequenza; per lo spettro ad alta frequenza, invece, viene applicato il modello astronomico empirico di Taessler e Andersson. L'effetto dei flussi radiativi, nello spettro a bassa frequenza, è considerato sia nei confronti del suolo, sia della vegetazione, dell'aria e delle superfici degli edifici. Il calcolo di tale flusso all'interno dell'ambiente urbano è molto complesso perché vede flussi in direzione orizzontale e verticale. ENVI-met include il flusso termico radiativo nel calcolo della temperatura dell'aria attraverso una componente additiva nell'equazione. Le equazioni dei flussi energetici radiativi sono risolte attraverso bilanci interni al volume della cella o ad elementi del modello. Per la soluzione di queste equazioni si rendono necessarie delle semplificazioni; una di queste è l'assunzione di un comportamento isotropo dell'aria, in modo tale che, per la risoluzione, siano necessarie solo tre temperature: quella dell'aria della cella considerata, quella della superficie del terreno e quella dell'atmosfera al di sopra della cella. In questo modo il problema del flusso radiativo viene ridotto ad un calcolo di emissività. Questa formulazione non computa l'effetto dei flussi radiativi orizzontali, né quello della presenza di vegetazione, che sono inclusi indirettamente tramite il calcolo delle temperature e dell'umidità relativa dell'aria e delle

superfici. All'interno del modello rappresentato i flussi di radiazione solare sono modificati, alterati, schermati, assorbiti dagli elementi presenti quali vegetazione ed edifici, oltre che dal suolo stesso. Per stimare l'effetto di tali flussi, si introduce il concetto di coefficiente di riduzione del flusso; tali coefficienti variano da 1 (flusso indisturbato) a 0 (flusso completamente assorbito). In totale sono impiegati 5 diversi coefficienti di riduzione che computano i diversi tipi di schermatura o interferenza con il flusso radiativo incidente, a seconda anche della lunghezza d'onda del flusso stesso:

$$- \sigma_{sw,dir}(z) = \exp(-F \cdot LAI'(z));$$

$$- \sigma_{sw,dif}(z) = \exp(-F \cdot LAI(z,zp));$$

$$- \sigma_{lw,down}(z) = \exp(-F \cdot LAI(z,zp));$$

$$- \sigma_{lw,up}(z) = \exp(-F \cdot LAI(0,z));$$

$$- \sigma_{svf}(z) = 1/360 \sum_{\pi=0}^{360} \cos\lambda(\pi).$$

Questi coefficienti descrivono l'influenza della vegetazione sulla radiazione shortwave diretta e diffusa (prima e seconda equazione) e sul flusso radiativo longwave diretto verso il basso e verso l'alto (terza e quarta equazione). Il coefficiente $\sigma_{svf}(z)$ è il fattore di vista del cielo (sky view factor), come gli altri coefficienti varia fra 1 (cielo libero) e 0 (cielo completamente oscurato). Nel calcolo del fattore di vista del cielo entra in gioco λ che rappresenta l'angolo massimo di schermatura, calcolato attraverso lo studio del cammino dei raggi solari e delle ombre. LAI è invece l'indice di area delle foglie della vegetazione (leaf area index) calcolato nei diversi range di quota, a cui si riferisce il coefficiente di riduzione:

$$LAI(z, z + \Delta z) = \int_z^{z + \Delta z} LAD(z) dz$$

Per il calcolo del coefficiente di riduzione della radiazione diretta viene utilizzato LAI' (ovvero il LAI calcolato tridimensionalmente) invece del LAI, che costituisce un parametro monodimensionale. LAI' è calcolato rispettando l'angolo d'incidenza dei raggi solari incidenti e del loro percorso analizzando l'interazione geometrica con gli oggetti presenti nel modello. Se non viene trovato alcun edificio che ostacoli il cammino del raggio solare verso il punto che si sta analizzando, si pone $\sigma_{sw,dir}(z) = 1$. In caso contrario il coefficiente è posto uguale a 0. Se ad interferire sul raggio solare è invece un elemento della vegetazione, allora il coefficiente viene calcolato come visto. La radiazione shortwave diretta e diffusa incidente in ogni punto del modello è calcolata come:

$$R_{sv,dir}(z) = \sigma_{sv,dir}(z) \cdot R_{sv,dir}^0$$

$$R_{sv,diff}(z) = \sigma_{sv,diff}(z) \cdot \sigma_{svf}(z) \cdot R_{sw,diff}^0 + (1 - \sigma_{sw,dir}(z)) \cdot a' \cdot R_{sw,dir}^0$$

Dove:

- $R_{sw,dir}^0$ e $R_{sw,diff}^0$ sono la radiazione shortwave diretta e diffusa entrante nel modello, senza alcun tipo di oscuramenti, deviazioni o alterazioni.

La seconda componente nel calcolo della radiazione diffusa rappresenta la riflessione diffusa della radiazione diretta incidente sugli elementi dell'ambiente interni al modello. Questa componente viene computata attraverso un albedo (a') fittizio che rappresenta la media degli albedo di tutti gli elementi presenti nel modello. Nella trattazione della radiazione longwave, rappresentata per la maggior parte da flussi di radiazione emessa dai componenti dell'ambiente, si suppone che gli elementi presenti in ambiente, che assorbono porzione della radiazione incidente, la sostituiscano emettendo un flusso radiativo a bassa frequenza. Secondo queste considerazioni, i flussi radiativi a bassa frequenza sono:

$$R_{lw,down}(z) = \sigma_{lw,down}(z) \cdot R_{lw}^0 + (1 - \sigma_{lw,down}(z)) \cdot \epsilon_F \cdot \sigma_B \cdot T_{F+}^4$$

$$R_{lw,up}(z) = \sigma_{lw,up}(z) \cdot \epsilon_s \cdot \sigma_B \cdot T_0^4 + (1 - \sigma_{lw,up}(z)) \cdot \epsilon_F \cdot \sigma_B \cdot T_{F-}^4$$

$$R_{lw,wall}(z) = (1 - \sigma_{svf}(z)) \cdot \epsilon_w \cdot \sigma_B \cdot T_w'^4$$

Dove:

- T_{F+}^4 e T_{F-}^4 rappresentano la temperatura media delle foglie nella parte sovrastante e sottostante la quota z di riferimento;
- $T_w'^4$ rappresenta invece la temperatura media delle superfici degli edifici;
- ϵ_F , ϵ_s , ϵ_w rappresentano le emissività delle foglie, del suolo e delle superfici degli edifici;
- σ_B è la costante di Boltzman.

La radiazione longwave incidente il sistema viene così suddivisa in tre componenti funzione della quota relativamente alla quale si vogliono analizzare i flussi radiativi. In realtà questi tre flussi comprendono al loro interno diverse componenti che è meglio analizzare singolarmente per poter meglio interpretare gli output che il software restituisce. Le componenti del flusso radiativo presenti nelle tre equazioni precedenti sono:

- $\sigma_{lw,down}(z) \cdot R_{lw}^0$ = flusso longwave proveniente dal cielo e incidente sul punto analizzato a quota z, al netto delle ostruzioni;
- $\sigma_{lw,up}(z) \cdot \epsilon_s \cdot \sigma_B \cdot T_0^4$ = flusso emesso dal suolo che ha assorbito parte della radiazione incidente e la riemette secondo l'ipotesi descritta in precedenza;
- $(1 - \sigma_{svf}(z)) \cdot \epsilon_w \cdot \sigma_B \cdot T_w'^4$ = flusso radiativo emesso dagli edifici;
- $(1 - \sigma_{lw,down}(z)) \cdot \epsilon_F \cdot \sigma_B \cdot T_{F+}^4 + (1 - \sigma_{lw,up}(z)) \cdot \epsilon_F \cdot \sigma_B \cdot T_{F-}^4$ = rappresentano la radiazione emessa dalla vegetazione: porzione emessa dalla vegetazione sovrastante la quota z e da quella sottostante.

Si comprendono dunque gli output in uscita dal software:

$$Q_{sky}(z) = \sigma_{lw,down}(z) \cdot R_{lw}^0$$

$$Q_{envir}(z) = \sigma_{lw,up}(z) \cdot \epsilon_s \cdot \sigma_B \cdot T_0^4 + (1 - \sigma_{svf}(z)) \cdot \epsilon_w \cdot \sigma_B \cdot T_w'^4$$

$$Q_{leafs}(z) = (1 - \sigma_{lw,down}(z)) \cdot \epsilon_F \cdot \sigma_B \cdot T_{F+}^4 + (1 - \sigma_{lw,up}(z)) \cdot \epsilon_F \cdot \sigma_B \cdot T_{F-}^4$$

Per quanto riguarda invece la componente di radiazione shortwave, il flusso incidente è suddiviso in due componenti che vengono mantenute identiche negli output del software:

$$Q_{kw,dir}(z) = R_{sw,dir}(z)$$

$$Q_{kw,diff}(z) = R_{sw,diff}(z)$$

6.3.4 Modello del vento

Il calcolo dei dati relativi al vento è uno dei processi più complessi dal punto di vista numerico: il rischio di divergenza di uno dei fattori è elevato, a causa delle numerose iterazioni di risoluzione e la possibilità che il bilancio di massa all'interno del volume della singola cella non risulti è altrettanto comune. Il software è stato studiato con preferenza dell'ottenimento di dati completi ed attendibili, dunque con la finalità che il calcolo giunga al termine senza divergenza, piuttosto che con l'obiettivo di una minuziosa precisione del risultato. I dati relativi al vento sono dunque attendibili, ma non accurati come quelli che si otterrebbero applicando un programma di simulazione dedicato.

Per la soluzione del problema del vento il programma implementa le equazioni di Navier-Stokes e l'equazione di Boussinesq. Le equazioni di Navier-Stokes rappresentano un sistema di

equazioni differenziali alle derivate parziali descriventi il comportamento di un fluido dal punto di vista macroscopico, per questo una delle condizioni necessarie per la risoluzione è la continuità del fluido fra le diverse interfacce di calcolo e fra i volumi in cui il modello è discretizzato.

Il sistema è il seguente:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u_i \frac{\partial u}{\partial x_i} = -\frac{\partial p}{\partial x} + Km \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2} \right) + f(V - Vg) - Su$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u_i \frac{\partial v}{\partial x_i} = -\frac{\partial p}{\partial y} + Km \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x_i^2} \right) + f(V - Vg) - Sv$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u_i \frac{\partial w}{\partial x_i} = -\frac{\partial p}{\partial z} + Km \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x_i^2} \right) + g \frac{\theta(z)}{\theta_{ref}(z)} - Sw$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial w}{\partial t} = 0$$

Dove:

- f è il parametro di Coriolis, pari a 10^{-4} (1/sec);
- p rappresenta la pressione locale della perturbazione;
- θ la temperatura dell'aria a quota z ;
- θ_{ref} la temperatura meteorologica del sistema, ovvero la temperatura media delle celle sovrastanti la quota z , escluse quelle occupate dagli edifici.

Si aggiunge al sistema un'ulteriore equazione, quella di continuità rappresentata dall'ultima espressione scritta. Quest'ultima deve essere verificata in ogni istante di calcolo in modo da rispettare la conservazione della massa. Per sintetizzare l'equazione si ricorda che:

$$u_i = u, v, w, \text{ con } i = 1, 2, 3$$

$$x_i = x, y, z, \text{ con } i = 1, 2, 3$$

Il sistema di equazioni deriva da tre principi fisici di base: conservazione della massa (equazione di continuità), secondo principio della dinamica (bilancio della quantità di moto) e primo principio della termodinamica (conservazione dell'energia). Attraverso il calcolo della distribuzione del flusso d'aria il programma calcola anche una prima distribuzione delle temperature e dei flussi di umidità. La superficie del suolo e la presenza di vegetazione

vengono considerate nell'equazione mediante i termini S_u , S_v e S_w , mentre le superfici degli edifici sono incluse come termini influenti solo sulla temperatura.

6.3.5 Modello della vegetazione

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

6.3.5.1 Flussi di calore e vapore

L'interazione fra le foglie delle piante e l'aria circostante è espressa attraverso tre flussi:

$$J_{f,h} = 1,1 \cdot \frac{1}{ra} \cdot (tf - ta)$$

$$J_{f,evap} = \frac{1}{ra} \cdot \Delta q \cdot \delta c \cdot f_w + \frac{1}{ra} (1 - \delta c) \Delta q$$

$$J_{f,trans} = \delta c \cdot \frac{1}{(ra + rs)} \cdot (1 - f_w) \Delta q$$

Dove:

- $J_{f,h}$ rappresenta il flusso di calore sensibile dalle foglie;
- $J_{f,evap}$ rappresenta il flusso di acqua liquida evaporata dalla foglia;
- $J_{f,trans}$ è invece il flusso di calore sensibile e latente legato alla traspirazione della foglia;
- Δq è la differenza di umidità assoluta fra foglia e aria;
- t_a è la temperatura dell'aria;
- t_f è la temperatura delle foglie;
- r_a rappresenta la resistenza aerodinamica all'aria della foglia, è funzione della sua geometria e della velocità del vento. Il diametro delle foglie è un valore parametrizzato in funzione del tipo di pianta. Tale valore è calcolato in modo da non incorrere in divergenze o valori non validi anche in caso di velocità del vento molto basse.

Il valore δc è posto pari a 1 se evaporazione e traspirazione possono avvenire (ovvero per $\Delta q > 0$), in caso contrario è posto pari a 0 e risulta possibile solo il fenomeno di condensazione. Si assume che solo la parte bagnata della foglia possa evaporare e, dall'altro lato, che solo la parte asciutta della foglia possa traspirare; per questo è necessario parametrizzare la porzione di foglia bagnata, rappresentata nelle equazioni da f_w :

$$f_w = \sqrt[3]{\frac{W_{dew}}{(W_{dew,max})^2}}$$

Dove:

- W_{dew} rappresenta la quantità di rugiada presente sulla foglia.

All'interno delle equazioni relative al calcolo dei flussi energetici delle foglie appare anche la resistenza dei pori della foglia (stomatal resistance, r_s). Essa rappresenta la resistenza del poro alla traspirazione ed è funzione della radiazione solare ad alta frequenza che incide sulla foglia, ed è influenzata anche dalla reazione di fotosintesi della foglia stessa.

Il modello di Deardorff calcola la resistenza dei pori in funzione della radiazione shortwave incidente la foglia, della radiazione massima che potrebbe incidervi e del contenuto d'acqua nella porzione di suolo interessata dalla presenza delle radici. Naturalmente entra in gioco anche un parametro funzione del tipo di pianta.

6.3.5.2 Bilancio energetico della foglia

Trascurando l'energia immagazzinata dalla foglia, il bilancio energetico della stessa, da cui viene ricavata la temperatura della foglia, può essere scritto come:

$$0 = R_{sw,net}(z) + R_{lw,net}(z) - C_p \cdot \rho \cdot J_{f,h} - \rho \cdot L \cdot (J_{f,evap} + J_{f,trans})$$

Dove:

- C_p rappresenta il calore specifico dell'aria;
- ρ è la densità dell'aria;
- L è il calore latente di vaporizzazione.

La radiazione shortwave netta assorbita dalla superficie delle foglie è rappresentata da:

$$R_{sw,net}(z) = (F \cdot R_{sw,dir}(z) + R_{sw,diff}(z)) \cdot (1 - a_f + tr_f)$$

In cui:

- F è un parametro adimensionale che descrive l'orientamento delle foglie rispetto al sole;
- a_f è l'albedo delle foglie;
- tr_f è il fattore di trasmissione delle foglie, posto uguale a 0,3.

L'equazione rappresenta anche il bilancio energetico della foglia relativamente ai flussi shortwave.

La radiazione longwave netta assorbita relativa alla temperatura T_f dalle foglie è espressa come:

$$R_{lw,net}(z, T_f) = \varepsilon_F \cdot R_{lw,down}(z) + R_{lw,wall}(z) + \varepsilon_F \cdot R_{lw,up}(z) + 2\varepsilon_F \cdot \sigma_B \cdot T_f^4 - (1 - \sigma_{svf}(z)) \cdot \sigma_B \cdot T_f^4$$

L'equazione esprime anche il bilancio energetico radiativo delle foglie per flussi a bassa frequenza.

I termini di sorgente o assorbimento interno di energia per il modello atmosferico vengono infine conteggiati in funzione dei flussi fra foglie ed aria:

$$Q_h = LAD(z) \cdot J_{f,h}$$

$$Q_q(z) = LAD(z) \cdot (J_{f,trans} + J_{f,evap})$$

L'equazione assume come ipotesi che solamente una parte di foglia partecipi allo scambio di calore e vapore con l'aria ed assorba la radiazione relativa allo spettro shortwave; per quanto riguarda invece la radiazione longwave entrambe le facce della foglia partecipano allo scambio radiativo.

6.3.5.3 Bilancio di massa d'acqua all'interno del sistema suolo – pianta

Per assicurare una simulazione realistica del meccanismo di traspirazione di acqua dalle piante e l'acqua intrisa nel terreno, la quantità d'acqua evaporata dalla pianta deve essere sottratta prima al suolo attraverso le radici. Ovvero la traspirazione ed evaporazione della pianta si traduce in un bilancio con l'assorbimento d'acqua della pianta dal terreno. Se il suolo non fornisce l'acqua necessaria, la resistenza dei pori alla traspirazione aumenta facendo diminuire il flusso d'acqua traspirata. La quantità totale di acqua (M_{trans}) traspirata dalla pianta è data dall'integrale sulla verticale, per tutta l'altezza della pianta, del flusso di traspirazione locale definito a quota Z .

$$M_{trans} = \rho \int_0^{z_p} LAD(z) \cdot J_{f,trans}(z) dz$$

Seguendo le indicazioni del modello di Prekels, l'acqua viene assorbita dal suolo in diversi strati attraverso le radici presenti nella zona di suolo ed è funzione della quantità di radici presenti in ogni strato di sottosuolo ($RAD(-z)$) e della diffusività idraulica dello strato ($D\mu(-z)$).

$$S_{\mu}(-z) = \frac{M_{trans}}{\rho w} (RAD(-z) \cdot D\mu(-z)) \cdot \frac{1}{[\int_{-z_r}^0 RAD(-z) \cdot D\mu(-z) Dz]}$$

6.3.6 Modello del suolo

Introdotti i dati di input relativi al suolo e ai suoi componenti, il software è in grado di calcolare la distribuzione di temperature ed acqua nel terreno. Per fare questo sono implementate le formule di Clapp e Hornberger, capaci di descrivere la conducibilità termica del terreno in funzione del suo contenuto d'acqua. L'equazione idraulica include anche un termine sottrattivo che computa l'acqua assorbita dalle radici delle piante. I bacini d'acqua sono rappresentati con speciali tipi di suolo. Fra i processi calcolati all'interno dell'acqua sono presenti la trasmissione e

l'assorbimento di radiazione ad alta frequenza. Il modello non include invece eventuali moti turbolenti dell'acqua; non è inoltre possibile simulare la presenza di elementi particolari come, ad esempio, le fontane.

Il modello del suolo è organizzato in 14 strati che giacciono al di sotto della superficie del suolo, fino a 2 metri di profondità. La risoluzione verticale varia da 0,01 m per gli strati più vicini alla superficie, fino a 0,5 m per quelli più profondi. I processi di scambio fra strati vengono simulati in termini di calore e trasferimento d'acqua. Fatta eccezione per lo strato più superficiale in cui il lo scambio di calore è calcolato in 3-D, il suolo è trattato come un sistema verticale monodimensionale. La distribuzione di calore (T) e di umidità (contenuto d'acqua in volume, μ) sono dati dalle equazioni monodimensionali:

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

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

Dove:

- K_s = diffusività termica
- K_μ = conduttività idraulica
- D_μ = diffusività idraulica

Tutti i coefficienti sono calcolati usando le equazioni fornite dal modello di Clapp e Hornberger. Nel caso di suolo naturale, la diffusività termica è funzione del contenuto di acqua ed è calcolata seguendo le indicazioni di Tjernstrom. Il fattore aggiuntivo S_μ rappresenta la porzione d'acqua assorbita dalle radici delle piante presenti nello strato di suolo in analisi e viene calcolato nel modello della vegetazione. Il termine relativo all'acqua evaporata dal suolo è esplicitato solo nel caso si effettui un bilancio del primo strato di suolo, così come la componente aggiuntiva che computa la condensazione d'acqua sul suolo.

6.3.7 Modello delle turbolenze

Si genera una turbolenza quando il flusso d'aria è tagliato ed ostacolato dalla presenza di un corpo fermo quale la parete di un edificio o un elemento della vegetazione. Sotto le condizioni del profilo di vento, la portata della turbolenza prodotta localmente può superare la dissipazione; in questo modo i vortici vengono trasportati dalla corrente d'aria principale che li investe. A seconda del profilo di vento si possono avere turbolenze che aumentano e vengono trasportate anche lontano dalla sorgente principale di tale variazione di flusso d'aria. Per simulare questo effetto viene applicato il cosiddetto "1.5 order turbulence closure model". Esso è applicato sul lavoro di Mellor e Yamada e si basa su due variabili: la turbolenza locale (E) e il

suo tasso di dissipazione (ϵ). L'energia cinetica in questo caso rappresenta una misura dell'intensità delle turbolenze dell'aria; essa risulta direttamente legata al trasporto locale di calore e umidità. Il sistema implementato è di due equazioni di cui la prima descrive la distribuzione di energia cinetica nell'aria in funzione della produzione dei moti convettivi e la seconda esprime la dissipazione dell'energia stessa.

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

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \mu_i \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} = K_\epsilon \left(\frac{\partial^2 \epsilon}{\partial x_i^2} \right) + C_1 \frac{\epsilon}{E} Pr - C_3 \frac{\epsilon}{E} Th + Q_\epsilon - C_2 \frac{\epsilon^2}{E}$$

Dove:

- i termini Pr e Th rappresentano la produzione e la dissipazione di energia relativa alle turbolenze d'aria dovute al flusso di vento e alla stratificazione termica. Pr è parametrizzato usando la deformazione tridimensionale del vettore del vento descritto localmente.

$$Pr = Km \cdot \left(\frac{\partial i_i}{\partial j_j} + \frac{\partial u_j}{\partial u_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

Con $i, j = 1, 2, 3$

$$Th = \frac{g}{\theta_{ref}(z)} \cdot Kh \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z}$$

- Q_E e Q_ϵ sono i termini rappresentanti le sorgenti e le dissipazioni relative alla vegetazione che si aggiungono al sistema secondo le teorie di Liu e Wilson; essi servono per considerare le turbolenze addizionali o gli ostacoli alle stesse prodotte dalla vegetazione sia nei confronti di piccoli che di grandi turbini.

$$Q_E = C_{d,f} \cdot LAD(z) \cdot W^3 - 4C_{d,f} \cdot LAD(z) \cdot |W| \cdot E$$

$$Q_\epsilon = 1,5C_{d,f} \cdot LAD(z) \cdot W^3 - 6C_{d,f} \cdot LAD(z) \cdot |W| \cdot \epsilon$$

L'ultimo termine descritto rappresenta la sorgente di dissipazione ed è basato sulla relazione di Kolmogorov.

Le costanti $C1 = 1,44$, $C2 = 1,92$, $C3 = 1,44$ sono state usate da Launder e Spalding. Va sottolineato che l'applicazione del modello appena descritto alle condizioni atmosferiche ha un margine d'incertezza, questo a causa del fatto che a quote più alte si hanno comportamenti del vento diversi dovuti alla diversa distribuzione degli effetti di dissipazione. Nel calcolo del modello i coefficienti di scambio sono calcolati assumendo le turbolenze come localmente isotrope attraverso le seguenti relazioni:

$$Km = C\mu \frac{E^2}{\epsilon}$$

$$Kh, Kq = 1,35Km$$

$$K_E = \frac{Km}{\sigma_E}$$

$$K_\epsilon = \frac{Km}{\sigma_\epsilon}$$

Con $C\mu = 0,09$; $\sigma_E = 1$; $\sigma_\epsilon = 1,3$

E e ϵ sono calcolate come una funzione della velocità tangenziale sulla singola superficie. All'interno di questo calcolo entra la rugosità della superficie stessa che svolge la funzione di attrito nei confronti dell'aria. Il sistema di equazioni riesce a descrivere l'andamento delle turbolenze dell'aria, ma la sua risoluzione risulta complessa, non lineare ed iterativa, con ampio rischio che durante lo svolgimento dei calcoli uno dei fattori diverga impedendone il proseguimento. Poiché questo rappresenta il principale rischio di blocco della simulazione, Envi-met implementa diversi meccanismi di controllo all'interno della risoluzione. Tale sistema di controllo vede una risoluzione delle equazioni tramite il metodo di rilassamento. Tenendo presente che le equazioni vengono risolte in modo iterativo, con il metodo di rilassamento il nuovo risultato non viene direttamente reinserito nell'equazione per il calcolo, ma viene "rilassato", ovvero pesato con il risultato precedente attraverso un coefficiente compreso tra 0 e 1. Il metodo impiegato per il calcolo delle turbolenze può portare ad un irrealistico accumulo di turbolenze negli strati più alti dell'atmosfera, dove le forze dissipative sono minori. Per evitare questo problema il programma impone un limite alla velocità di dissipazione attraverso il modello monodimensionale.

Il modello di simulazione applicato al problema dell'energia cinetica e delle turbolenze permette di calcolare questi parametri in modo continuo, ovvero per ogni time-step di simulazione, non fermandosi una volta trovata una soluzione stazionaria, come invece avveniva nelle versioni precedenti del software. In questo modo le turbolenze tengono conto in ogni momento anche

della temperatura e dell'umidità relativa dell'aria, ed anche questi parametri sono disponibili in maniera continua.

6.3.8 Superfici

Un primo bilancio energetico è eseguito sulla superficie del suolo. Da qui vengono calcolate la temperatura, l'umidità e i flussi di calore sensibile e latente relativi alla superficie stessa.

I muri degli edifici e il suolo rappresentano le condizioni a contorno del modello atmosferico e del modello del suolo per i volumi discreti ad essi adiacenti. Le temperature dei muri e dei tetti degli edifici sono calcolate per ogni cella, rispettando l'orientamento della superficie, l'albedo, l'ombreggiamento e lo scambio termico con l'interno dell'edificio. Gli scambi termici fra le superfici degli edifici sono invece calcolati precedentemente attraverso il flusso di vento e le turbolenze dell'aria. La temperatura del suolo, in regime di equilibrio, può essere ricavata dal bilancio energetico della superficie stessa.

$$0 = R_{sw,net} + R_{lw,net} - Cp \cdot \rho \cdot J_h^0 - \rho \cdot L \cdot J_V^0 - G$$

Dove:

- J_h^0 e J_V^0 rappresentano i flussi di calore e vapore. Verranno descritti in maniera completa in seguito;
- G è il flusso di calore assorbito/trasmesso dal suolo. Anch'esso verrà trattato in maniera esplicita più avanti nell'analisi.
- $R_{sw,net}$ e $R_{lw,net}$ a quota $z = 0$ rappresentano i flussi shortwave e longwave netti assorbiti dalla superficie del suolo e sono calcolati rispettando la temperatura della superficie stessa e degli altri elementi "visti" dal punto del suolo in analisi e con cui esso scambia energia radiativa.

6.3.8.1 Flussi radiativi

Usando lo schema dei flussi radiativi, descritto nel paragrafo relativo al modello atmosferico, i flussi netti possono essere descritti come:

$$R_{sw,net} = (r_{sw,dir}(z) \cdot \cos \beta + R_{sw,diff}(z = 0)) \cdot (1 - a_s)$$

L'equazione può essere letta come il bilancio energetico radiativo shortwave della superficie del suolo; semplificando il significato dei termini essa può essere interpretata osservando che la radiazione netta assorbita è uguale alla differenza fra la radiazione incidente, diretta e diffusa, e la radiazione riflessa (calcolata in funzione dell'albedo, a_s , della superficie stessa). Si ricorda che all'interno del calcolo delle radiazioni incidenti sono presenti anche i coefficienti di

riduzione, dunque il risultato ottenuto ($R_{sw,net}$) è al netto delle ostruzioni al flusso proveniente dall'alto.

La radiazione diretta incidente è calcolata in funzione del $\cos\beta$ che rappresenta l'angolo d'incidenza della radiazione con la superficie e il suolo. Il calcolo della radiazione netta longwave, invece, deve tenere conto dell'influenza della vegetazione e degli edifici, delle loro ostruzioni al flusso radiativo diretto e dei flussi emessi dagli stessi elementi. Per semplicità il bilancio della radiazione longwave è suddiviso in due fattori: la radiazione non schermata dagli edifici ($R_{lw,net,unsh}$ ovvero unshielded) e quella invece schermata ($R_{lw,net,sh}$ ovvero shielded). La porzione non schermata comprende i flussi radiativi scambiati fra il suolo e la vegetazione, la porzione di radiazione schermata invece rappresenta gli scambi energetici fra suolo ed edifici.

$$R_{lw,net} = \sigma_{svf} \cdot R_{lw,net,unsh} + (1 - \sigma_{svf}) \cdot R_{lw,net,sh}$$

$$R_{lw,net,unsh} = \sigma_{lw,down}(z=0) \cdot (R_{lw}^0 - \varepsilon_s \cdot \sigma_B \cdot T_0^4) + (1 - \sigma_{lw,down}(z=0)) \cdot (\sigma_B \cdot T_f^4 - \sigma_B \cdot T_0^4) \cdot \frac{\varepsilon_F \varepsilon_S}{\varepsilon_F + \varepsilon_S - \varepsilon_F \varepsilon_S}$$

$$R_{lw,net,sh} = \frac{\varepsilon_W \varepsilon_S}{\varepsilon_W + \varepsilon_S - \varepsilon_F \varepsilon_S} [MAX(\sigma_B T_0^4; \sigma_B T_W^4) - \sigma_B T_0^4]$$

Il fattore di vista del cielo entra nell'equazione per pesare le due radiazioni in funzione della parte di cielo, e dunque di radiazione, che può incidere sul punto di suolo analizzato; tale coefficiente non entra infatti nel calcolo delle componenti del flusso schermata e non schermata. Nell'equazione della $R_{lw,net,sh}$ i pedici "w" sono posti per indicare emissività e temperatura dei muri degli edifici. I calcoli dei flussi radiativi includono alcune ipotesi e semplificazioni che devono essere descritte. Per la componente non schermata della radiazione si assume che il flusso emesso dagli edifici sia rilevante solo se i muri emettenti hanno una temperatura maggiore di quella del suolo. In caso contrario, la riflessione del flusso radiativo della superficie sul muro è l'effetto prevalente. Nel caso in cui si stiano effettuando analisi relative ad una superficie di un muro, lo schema radiativo è più semplice di quello generico appena descritto. In tal caso il contributo della vegetazione è semplificato, infatti sono disponibili informazioni insufficienti riguardo i flussi radiativi orizzontali cui partecipa anche la vegetazione. Per muri verticali si assume che la frazione non schermata di radiazione sia composta per il 50% da radiazione a bassa frequenza proveniente dal cielo e per il restante 50% da radiazione proveniente dal suolo. Per la porzione schermata, invece, si assume che 2/3 della radiazione sia proveniente dal suolo e riflessa dagli edifici. Per i tetti le componenti radiative sono le stesse del suolo ma con parametri calcolati per $Z \neq 0$ e gli strati di vegetazione eventualmente presenti sul tetto non vengono considerati ulteriormente.

6.3.8.2 Flussi di calore sensibile e vapore

I flussi di calore sensibili e vapore uscenti dal suolo sono calcolati come:

$$J_h^0 = -Kh \frac{\partial T}{\partial z_{z=0}} = -Kh \frac{\theta(k=1) - T_0}{0,5\Delta z(k=1)}$$

$$J_v^0 = -Kv \frac{\partial q}{\partial z_{z=0}} = -Kv \frac{q(k=1) - q_0}{0,5\Delta z(k=1)}$$

Dove:

- $K = 1$ indica il primo strato di calcolo sovrastante o adiacente la superficie del suolo di cui si stanno analizzando i flussi;
- Kv e Kh sono invece i coefficienti di scambio per il vapore e per il calore fra la superficie del suolo e l'aria. Entrambi sono calcolati nel rispetto degli effetti della stratificazione termica fra la superficie del suolo e gli strati d'aria sovrastanti.

Nel caso in cui le analisi vengano effettuate non sulla superficie del suolo ma sulla superficie di un muro di uno degli edifici presenti nel modello, i flussi di vapore e calore devono essere riadattati in funzione dell'orientamento del muro.

6.3.8.3 Flussi di calore attraverso il suolo e gli edifici

Il flusso di calore che viene trasmesso attraverso il suolo viene calcolato fra la superficie del suolo e il primo strato di suolo sottostante, in funzione delle differenze di temperatura.

$$G = \lambda_s (K = 1) \cdot \frac{T_0 - T(K = -1)}{0,5\Delta z(k = -1)}$$

Dove:

- λ_s rappresenta la conduttività termica del primo strato di suolo e dipende dal materiale e dal contenuto d'acqua dello strato stesso;

Per gli edifici G è sostituito da Q_w , calcolato come:

$$Q_w = k \cdot (T_w - T_a)$$

In cui:

- k indica il coefficiente di scambio termico per trasmissione (conduttività termica) del muro dell'edificio;
- T_a è la temperatura interna all'edificio.

Questo modello di calcolo semplifica notevolmente l'analisi poiché non tiene conto della capacità termica della chiusura dell'edificio e dunque l'accumulo di calore che può essere poi ritrasmesso all'esterno con sfasamento di tempo e lunghezza d'onda. A seguito di questa ultima analisi delle componenti dei flussi radiativi, soprattutto quello relativo al suolo, è possibile interpretare il significato fisico degli altri output forniti dal software:

$$Q_{lw,surf} = Cp \cdot \rho \cdot J_h^0 + \rho \cdot L \cdot J_v^0 + R_{lw,net}$$

$$Q_{lw,budg} = G(\text{suolo}) \quad \text{oppure} \quad Q_{lw,budg} = Q_w(\text{muro})$$

Il bilancio vede termini tutti positivi; il segno diventa funzione del verso del flusso. In questo modo il bilancio energetico del suolo (e di qualsiasi altra superficie) può essere chiuso e l'interpretazione degli output del software raggiunge una chiara interpretazione fisica. La radiazione netta $R_{sw,net}$ non corrisponde a nessun output del software.

6.4 Risultati dell'analisi

Il risultato dei numerosi calcoli di simulazione che il software esegue è un grande ammontare di dati in uscita (output). Gli output sono raggruppati autonomamente da Envi-met in sottocartelle relative ad ogni simulazione, suddivisi per tipologia di output e di parametri espressi in ogni file. Le sottocartelle sono sette e sono così denominate: Atmosphere, BOTworld, Inflow, Log, Receptors, Soil, Surface. Escluderemo dalla nostra attenzione i file contenuti nella seconda e quarta cartella. Essi, infatti, nel primo caso, si riferiscono a dati relativi al benessere di virtuali fruitori dell'area analizzata, nel secondo caso, sono invece dati attinenti alla prima lettura del modello di area e del file di configurazione da parte dell'interfaccia di simulazione. Il software Envi-met prevede infine due interfacce di lettura dei dati in uscita: Leonardo e Xtract.

6.4.1 Atmosphere

La cartella Atmosphere contiene due file per ogni ora di simulazione: il primo contiene i dati dell'analisi scritti in codice binario, il secondo è un file di sistema necessario per interpretare il codice di scrittura del primo file. Questi file orari contengono, per ogni quota z corrispondente ad una cella, i dati relativi a: vento (velocità sulle tre direzioni, velocità complessiva, direzione risultante, variazione percentuale di velocità), umidità relativa e assoluta, temperatura dell'aria espressa attraverso la temperatura potenziale (di cui è indicata anche la variazione oraria), la temperatura media radiante e le temperature superficiali, espresse attraverso la temperatura del bordo della cella. Il file in oggetto contiene dati relativi all'intero spazio tridimensionale, ovvero corrispondenti ad ogni cella componente il modello. Attraverso le interfacce di lettura, come si vedrà più avanti, è possibile leggere questi dati "sezionandoli" su piani spaziali (piano xy a diverse quote z , piano yz a diversi livelli della coordinata x , piano zx a diversi livelli y) corrispondenti alle celle.

Si sottolinea come i dati siano singoli per ogni cella, dunque il volume discreto che compone il modello, qualsiasi sia la sua dimensione, è considerato come un punto singolo. Nel nostro caso, usando celle di dimensioni $dx = 5$ metri, ad ogni volume $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 5\text{ m}$ è associato un solo valore di temperatura dell'aria, di velocità del vento, direzione del vento e così per tutti i parametri. Envi-met, inoltre, svolge le equazioni di calcolo di tutti i dati ad ogni time-step, ovvero ogni 3 - 5 e 10 secondi (a seconda dell'altezza del sole sull'orizzonte), ma restituisce solamente un dato ogni ora. Esso è rappresentato dal valore esatto che ogni parametro assume al momento di calcolo coincidente con lo scadere dell'ora. Non è una media dei valori ottenuti dai calcoli durante tutta l'ora, ma il dato conseguente ai precedenti, secondo i calcoli.

6.4.2 Inflow

La cartella denominata Inflow contiene dati relativi al modello monodimensionale che Envi-met calcola inizialmente per avere dei dati di partenza impiegati come forzanti per la risoluzione

delle equazioni successive. Esiste dunque un file per ogni ora di simulazione che esprime i valori di alcuni parametri, da $z = 0$ metri a $z = 2500$ metri, ad intervalli di spazio sempre maggiori con l'aumentare della quota. I parametri sono pressoché tutti relativi al vento e alle turbolenze dei flussi d'aria, ovvero i dati iniziali di cui il software necessita maggiormente. Esiste anche un valore di temperatura e di umidità specifica dell'aria. Alla quota coincidente col punto più alto del modello tridimensionale, nell'ora di inizio della simulazione, tale valore di temperatura coincide con il valore iniziale imposto del file di configurazione e varia di ora in ora secondo la radiazione solare in funzione del modello climatico applicato.

6.4.2.1 Receptors

La cartella indicata come "Receptors" contiene tutti i dati relativi ad eventuali recettori posti nel modello. È dunque presenti una sottocartella per ogni recettore presente. Per meglio comprendere i dati di output in oggetto è necessario ricordare che un recettore posto in un punto del modello restituisce i dati relativi a tutta la colonna di volumi discreti posta sopra il recettore stesso e anche quelli relativi alla porzione di suolo sottostante. All'interno di ogni sottocartella, dunque, sono presenti tre tipologie di file:

- ATM (dati atmosferici);
- FLX (dati relativi ai flussi radiativi scambiati);
- SOI (dati relativi al suolo).

I file ATM (atmosfera) sono file orari che contengono i dati relativi all'aria e al vento. Si sottolinea che i recettori sono posti sul suolo del modello e che è impossibile porsi ad una quota diversa dallo zero. A conseguenza di ciò, se sopra di essi è posto un edificio, i valori relativi al file ATM saranno tutti nulli.

I file indicati come FLX esprimono invece i valori dei flussi energetici radiativi scambiati dalla superficie di suolo identificata dal recettore. Anche in questo caso i dati sono tutti relativi alla quota zero e insieme ai diversi flussi, differenziati per lunghezza d'onda e direzione. Sono presenti informazioni riguardanti la temperatura, la sua variazione nel tempo, il vento (direzione, velocità, variazione nel tempo), l'umidità relativa, la vegetazione presente e i parametri legati alle turbolenze dell'aria.

I file indicati con "SOI" sono invece relativi al suolo e forniscono informazioni riguardanti la colonna di suolo sottostante il recettore. Un file per ogni ora indica la temperatura ed il contenuto d'acqua del suolo a diverse profondità da 0 a 175 cm, a distanze telescopiche.

I file relativi ai recettori sono molto utili per l'analisi del modello, poiché permettono di avere immediatamente informazioni relative ad un singolo punto e su tutta l'altezza dello stesso. Un

limite forte è tuttavia rappresentato dall'impossibilità di porre il sensore sopra un edificio, per esempio, o accostato ad una superficie verticale. Per avere le temperature superficiali del tetto o delle pareti degli edifici è necessario infatti ricorrere a sezioni orizzontali o verticali dei file output tridimensionali, che possono diventare difficoltose se gli edifici modellati presentano altezze diverse, anche a causa di una certa confusione relativa alla coordinata a cui il dato viene restituito.

6.4.2.2 Soils

La cartella "Soil" si presenta come il file "Atmosphere" presentando due file per ogni ora di simulazione. I dati possono essere letti attraverso l'interfaccia grafica Leonardo o con Xtract.

Dai dati in questa cartella è possibile ottenere informazioni relative alla temperatura del suolo ed al suo contenuto d'acqua a diverse profondità dalla superficie fino a $z = - 50$ cm.

6.4.2.3 Surface

La cartella "Surface" contiene due file per ogni ora di simulazione, in modo identico alle precedenti cartelle Soil e Atmosphere. I file surface contengono dati relativi solamente alla quota $z = 0$, si tratta dunque di dati bidimensionali. Essi presentano informazioni relative alla temperatura della superficie e alla sua variazione nel tempo, all'umidità relativa dell'aria e alla velocità del vento alla prima quota sovrastante la superficie del suolo.

6.5 Interfacce di lettura degli output

6.5.1 Leonardo

Leonardo è un software che fornisce una rappresentazione grafica dei dati output contenuti in file "tridimensionali", ovvero quei file che non possono essere letti se non attraverso queste interfacce predisposte dal software stesso. Importando uno di questi file all'interno dell'interfaccia Leonardo, è possibile visualizzare l'elenco dei parametri output presenti in esso e selezionare il metodo di rappresentazione più adeguato per ognuno. Leonardo permette di visualizzare i dati attraverso quattro principali metodi grafici: data, vector, isoline, special. Essi rappresentano dei layer sul disegno ed è possibile visualizzarli singolarmente o contemporaneamente a seconda del tipo di rappresentazione che si desidera ottenere, oppure svolgere operazioni fra di essi.

6.5.1.1 Data

Il layer visualizza i dati in scala cromatica, con legenda affiancata alla mappa. È utile, ad esempio, per la rappresentazione del gradiente di temperatura.

6.5.1.2 Vector

Il layer Vector visualizza i dati attraverso delle frecce (vettori) direzionati e con modulo proporzionale al valore. Esso rappresenta un ottimo metodo di rappresentazione del flusso d'aria e del vento poiché le frecce sono in grado di esprimere la direzione e anche i punti in cui la velocità diventa maggiore.

6.5.1.3 Special

Il layer Special permette di visualizzare i dati con un valore o un significato singolo. Esso è usato principalmente per l'indicazione degli edifici e della vegetazione all'interno della rappresentazione grafica degli altri parametri.

6.5.1.4 Isoline

Il metodo di rappresentazione è quello delle isolinee. Permette di visualizzare molto efficacemente parametri come fattore di vista del cielo, temperature, flussi radiativi incidenti, fattori legati alla turbolenza dell'aria e velocità del vento. Accanto alle curve viene indicato il valore del parametro che essa rappresenta.

La rappresentazione dei dati attraverso l'interfaccia Leonardo è molto utile per avere un'idea immediata e chiara dei dati, per identificare l'incidenza di alcuni fattori sul modello e per comprendere le variazioni che alcuni parametri hanno nel tempo o nello spazio. È utile principalmente per identificare anche le zone critiche del modello a seconda del tipo di analisi che si desidera effettuare. La rappresentazione, tuttavia, è puramente grafica e quindi

qualitativa. La legenda, benché aiuti a rendere leggibile il dato, permette una quantificazione dello stesso molto sommaria. Da Leonardo non si ottengono infatti i reali valori dei parametri rappresentati e non si possono effettuare analisi numeriche più approfondite sui dati contenuti nei file tridimensionali e bidimensionali (cartelle Atmosphere e Surface). Per questo è presente un'altra interfaccia di lettura degli output: Xtract.

6.5.2 Xtract

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

6.6 L'analisi dell'intervento

Si sono predisposti due differenti modelli: l'intervento progettato, descritto precedentemente, ed un parcheggio immaginario, identico al primo ma privo delle superfici inerbite ed alberate. Tramite il confronto tra le temperature superficiali dei due modelli, infatti, si potrà quantificare l'incidenza della vegetazione nell'intervento. Tramite l'interfaccia grafica, quindi, si è modellata l'area di intervento, disegnandone la geometria ed assegnando alle superfici le rispettive proprietà. A causa delle limitazioni dimensionali della griglia di modellazione e dei lunghi tempi di simulazione del software si è deciso di modellare un'area di 35.000 m² con una griglia caratterizzata da volumi di dimensioni 5 m x 5 m x 5 m. In pratica l'area modellata contiene il parcheggio oggetto dell'analisi e uno spazio intorno di almeno 30 m in tutte le direzioni. Grazie all'utilizzo delle 'Nesting Grids', descritte successivamente, che aggiungono circa 45 m dai bordi del modello in tutte le direzioni, il parcheggio può essere quindi analizzato con almeno 75 m di distanza dai bordi, punto singolare dell'analisi. Il parcheggio è stato modellato seguendo fedelmente la geometria del progetto come un edificio alto 12 m; inoltre, per simulare la presenza della collina presente a nord-ovest del progetto, è stato inserito, nella stessa posizione del rilievo, un muro di 20 m di altezza. Per quanto riguarda l'altezza del modello, il software raccomanda un limite pari al doppio della quota massima dell'edificio più alto. Si è deciso quindi di attribuire al modello un'altezza limite di 10 volumi, pari a 50 m. Modellato il parcheggio, si sono assegnate in copertura le superfici verdi previste, costituite da erba ed alberi, seguendo i disegni di progetto. Si sono specificati infine i vari tipi di terreno nell'intorno dell'intervento quali: sabbia per la spiaggia; granito scuro per gli scogli; acqua profonda, per il mare; calcestruzzo, per il piazzale in cemento; asfalto, per la strada e terreno per tutto il resto.

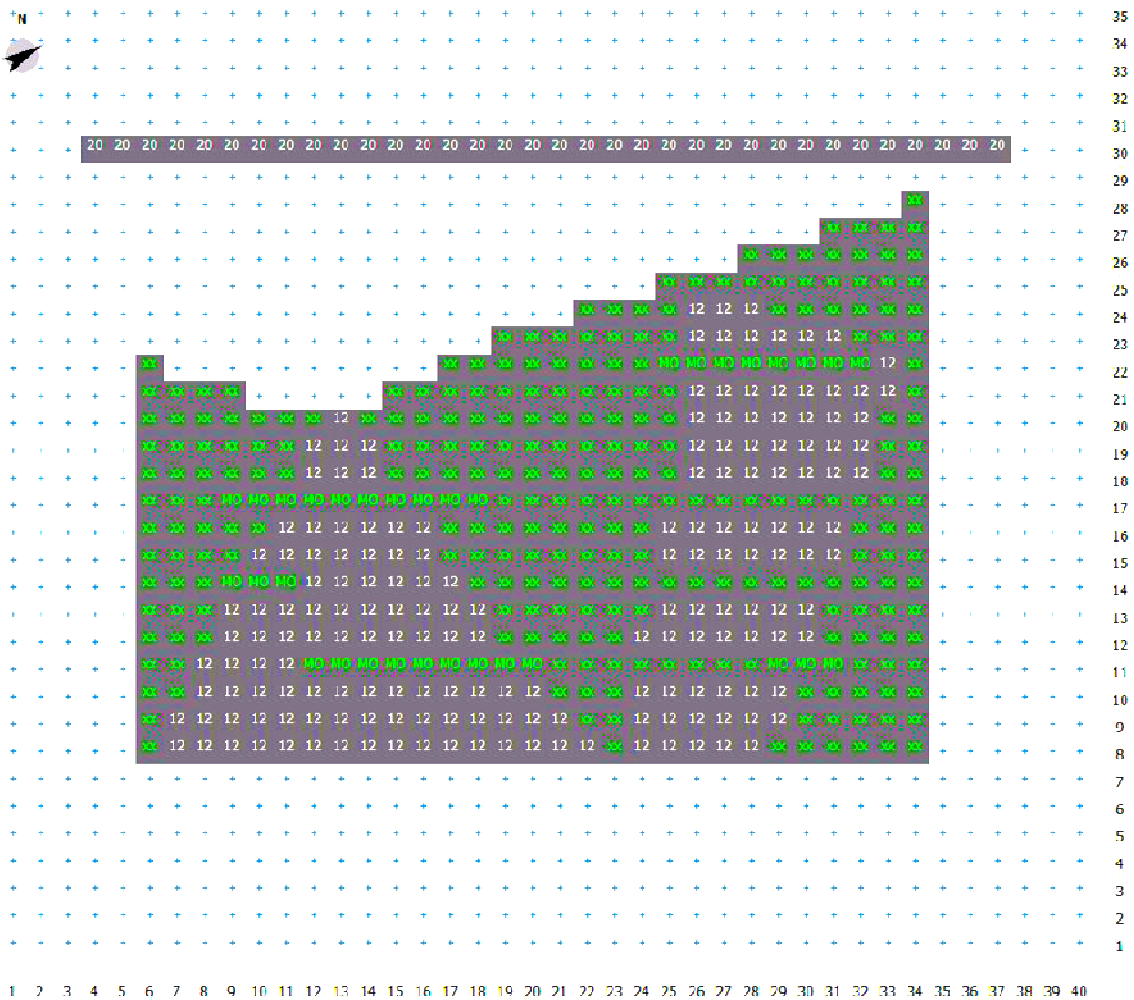


Figura 39: modellazione del parcheggio inerbito mediante il software ENVI-met

Successivamente si è analizzato lo stesso intervento senza la vegetazione con il fine di determinare la differenza tra i due modelli. I due modelli sono identici sia per le tipologia di materiali, sia per i tipi di terreno. E' stato utilizzato inoltre lo stesso file di configurazione.

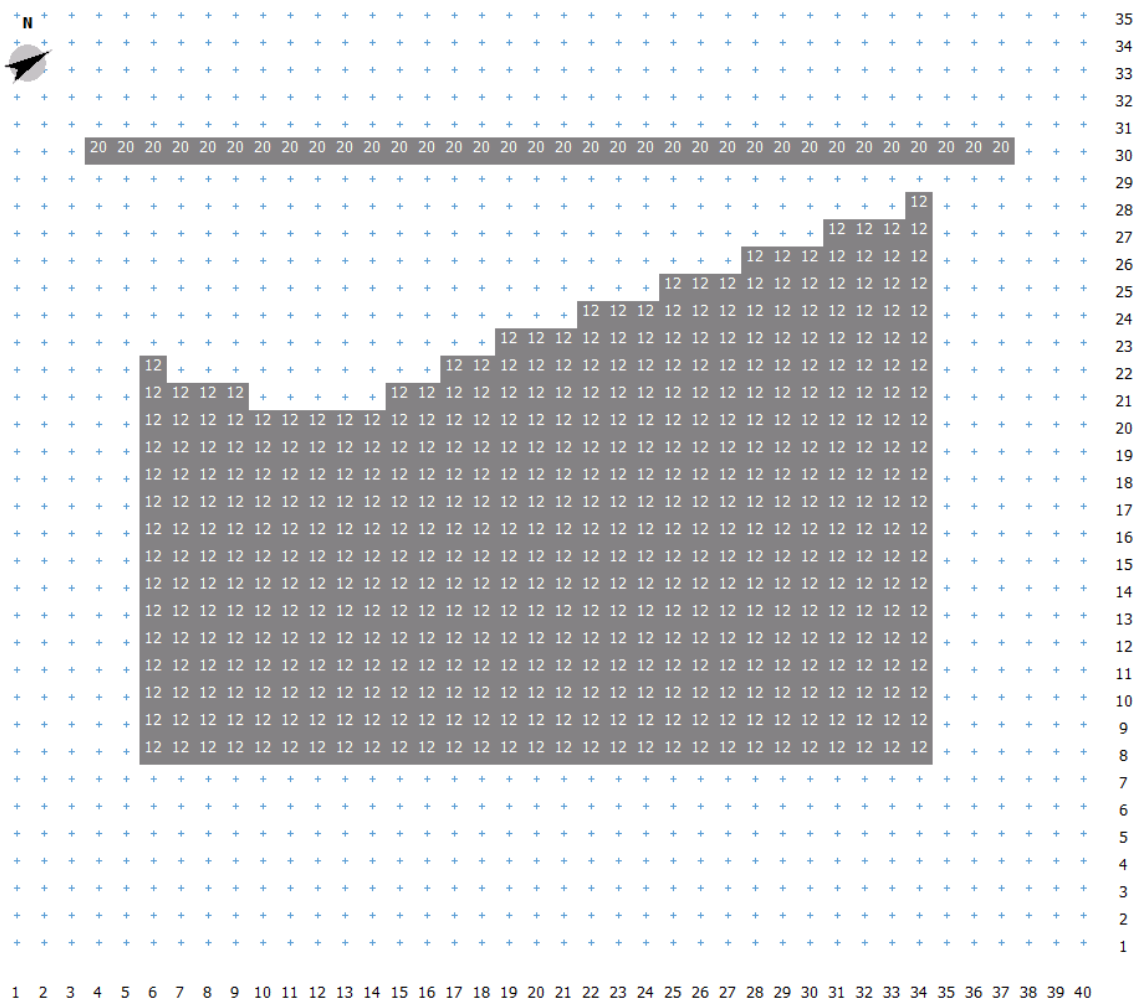


Figura 40: modellazione del parcheggio in calcestruzzo mediante il software ENVI-met

Per quanto riguarda il file di configurazione, i parametri principali che sono stati impostati sono:

- giorno e ora di inizio dell'analisi: 16 luglio, ore 06.00;
- durata totale della simulazione: 96 ore;
- velocità del vento a 10 m del suolo: 3 m/s;
- direzione principale del vento (0:N, 90:E, 180:S, 270:W): 12;
- coordinate: latitudine 44,24 N, longitudine 8,55 E;
- condizioni atmosferiche: cielo sereno.

Tutti gli altri parametri del "Configuration file" sono specificati in allegato D

6.7 Risultati

Si presentano i risultati estrapolati dall'analisi utilizzando l'interfaccia grafica di Leonardo. Tramite la modellazione si sono ricavate la distribuzione sul piano orizzontale del parcheggio della temperatura media radiante, delle temperatura potenziale, della temperatura superficiale e della leaf temperature. Successivamente si mostrano i risultati riferiti alle 11.00 del 18 luglio poiché è risultato, con l'analisi climatica, il momento con la radiazione più alta dell'anno.

6.7.1 La distribuzione della temperatura media radiante

I primi risultati mostrano la distribuzione della temperatura media radiante nei due modelli. La Temperatura Media Radiante T_{mr} 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.



Figura 41: parcheggio inerbito, sezione orizzontale alla quota del parcheggio, distribuzione della temperatura media radiante

Dalla figura 38 si evidenzia che la temperatura media radiante maggiore è in corrispondenza delle superfici in calcestruzzo e corrisponde a circa 48 °C; presso le superfici inerbite, invece, si nota un considerevole abbassamento della temperatura a circa 37 °C. Lungo le fasce alberate, infine, vi sono abbassamenti più vari e considerevoli compresi tra 29 °C e 40 °C a seconda dell'ombreggiamento.

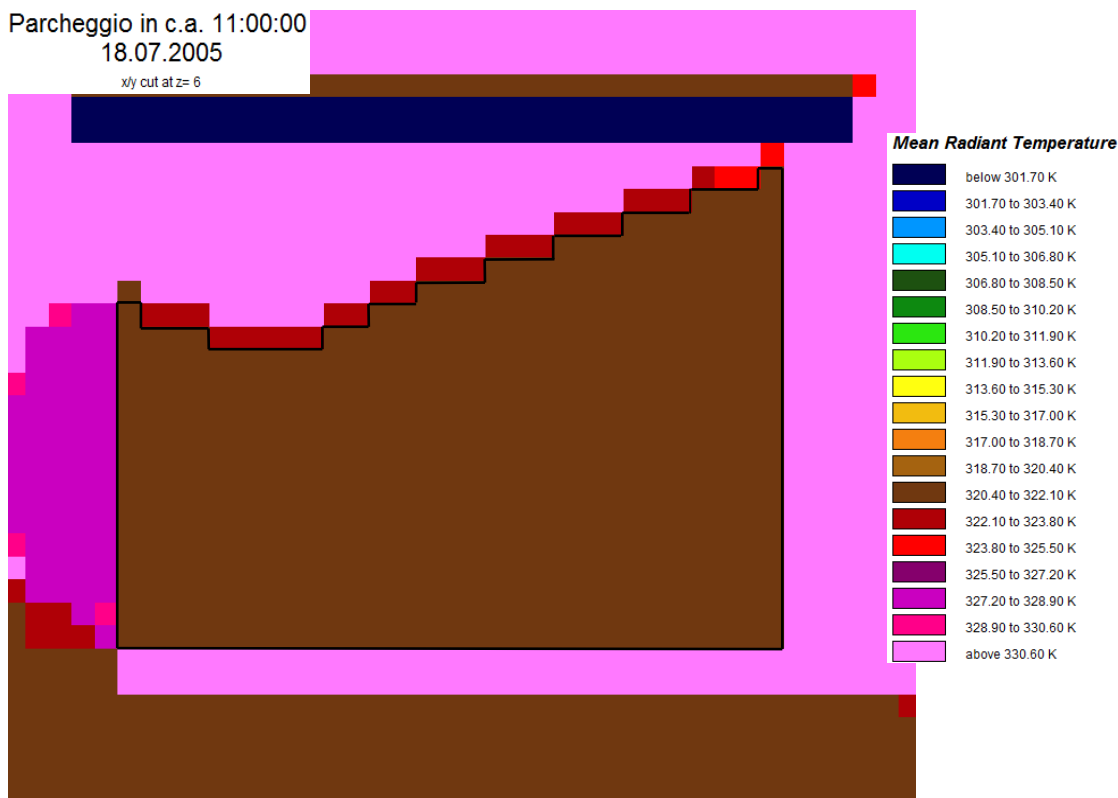


Figura 42: parcheggio in calcestruzzo, sezione orizzontale alla quota del parcheggio, distribuzione della temperatura media radiante

L'analisi dell'intervento modellato senza vegetazione conferma la temperatura media radiante di 48 °C per le superfici in calcestruzzo. In questo caso la temperatura è omogenea in tutta l'area del parcheggio.

La temperatura media radiante è importante per il calcolo della temperatura operante, indicatore del benessere delle persone che usufruiscono dell'intervento. La temperatura operante o operativa t_0 è la temperatura uniforme di una cavità fittizia in cui il soggetto scambierebbe per irraggiamento e convezione la stessa energia che scambia nell'ambiente reale generalmente non uniforme.

La temperatura operativa è data dalla combinazione tra la temperatura dell'aria e la temperatura media radiante:

$$t_0 = (h_c t_a + h_r t_{mr}) / (h_c + h_r)$$

Dove:

- h_c è il coefficiente di scambio termico convettivo;
- h_r è il coefficiente di scambio termico radiante.

6.7.2 La distribuzione della temperatura potenziale

Per calcolare la temperatura dell'aria, si analizzano le temperature potenziali dei due modelli. La temperatura potenziale è definita come la temperatura che una particella insatura di aria secca avrebbe se fosse portata adiabaticamente e reversibilmente dal suo stato iniziale ad una pressione standard (P_0) tipicamente 100 kPa. L'espressione matematica della temperatura potenziale è:

$$\theta = T \left(\frac{P_0}{P} \right)^\kappa$$

Dove:

- θ : temperatura potenziale;
- T : temperatura;
- κ : costante di Poisson. Per l'aria secca, $\kappa = 0,2854$. Per l'aria umida:

$$\kappa = \frac{R_d}{C_{pd}} \frac{1 + r_v / \epsilon}{1 + r_v c_{pv} / c_{pd}} \cong 0.2854(1 - 0,24r_v)$$

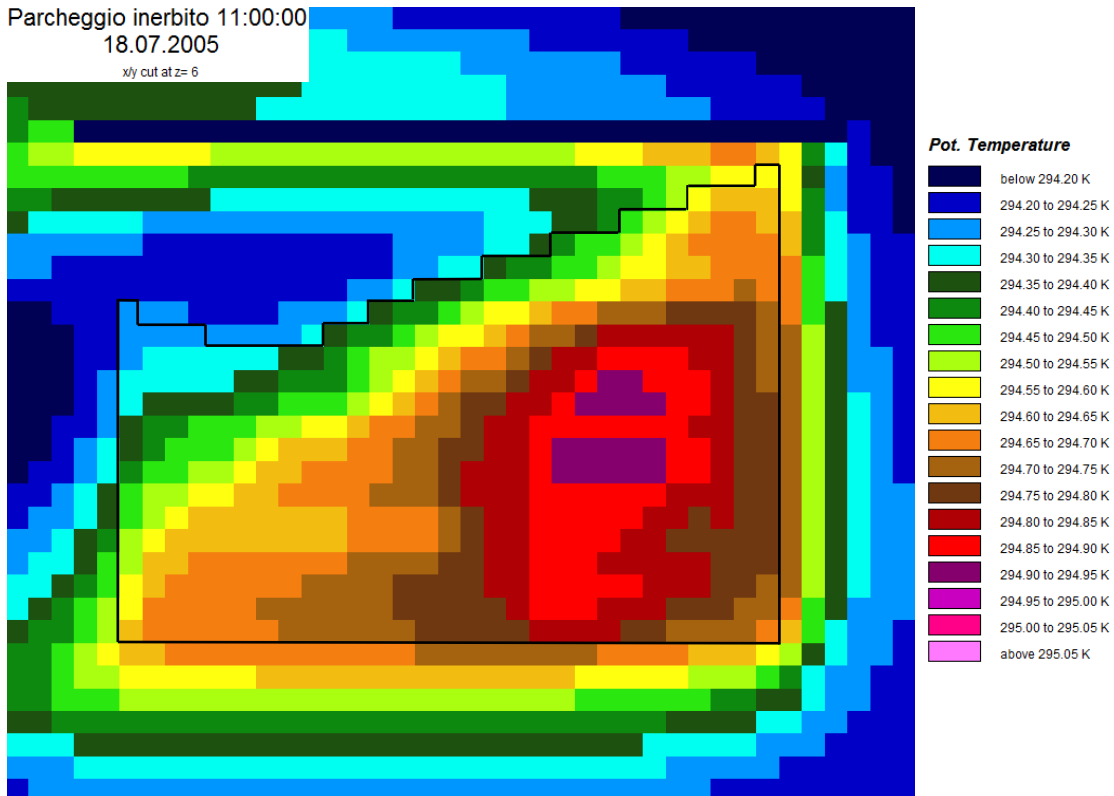


Figura 43: parcheggio inerbito, sezione orizzontale alla quota del parcheggio, distribuzione della temperatura potenziale

Dalla figura precedente si nota che la distribuzione della temperatura potenziale non è influenzata dalla distribuzione del verde, ma solamente dall'orientamento del parcheggio. La differenza tra la zona con la temperatura più alta (evidenziata in viola) e la superficie con la temperatura più bassa (in azzurro) è molto bassa. Questo risultato potrebbe essere causato dal fatto che il modello è stato discretizzato in volumi troppo grandi per essere influenzato dalle temperature superficiali. Il volume d'aria considerato, infatti, ha un'altezza di 5 m. La temperatura più elevata pari a 294,90 °K, corrisponde ad una temperatura dell'aria di 22,5 °C, la temperatura più bassa, invece, pari a 294,3 °K, corrisponde ad una temperatura dell'aria di 22 °C.

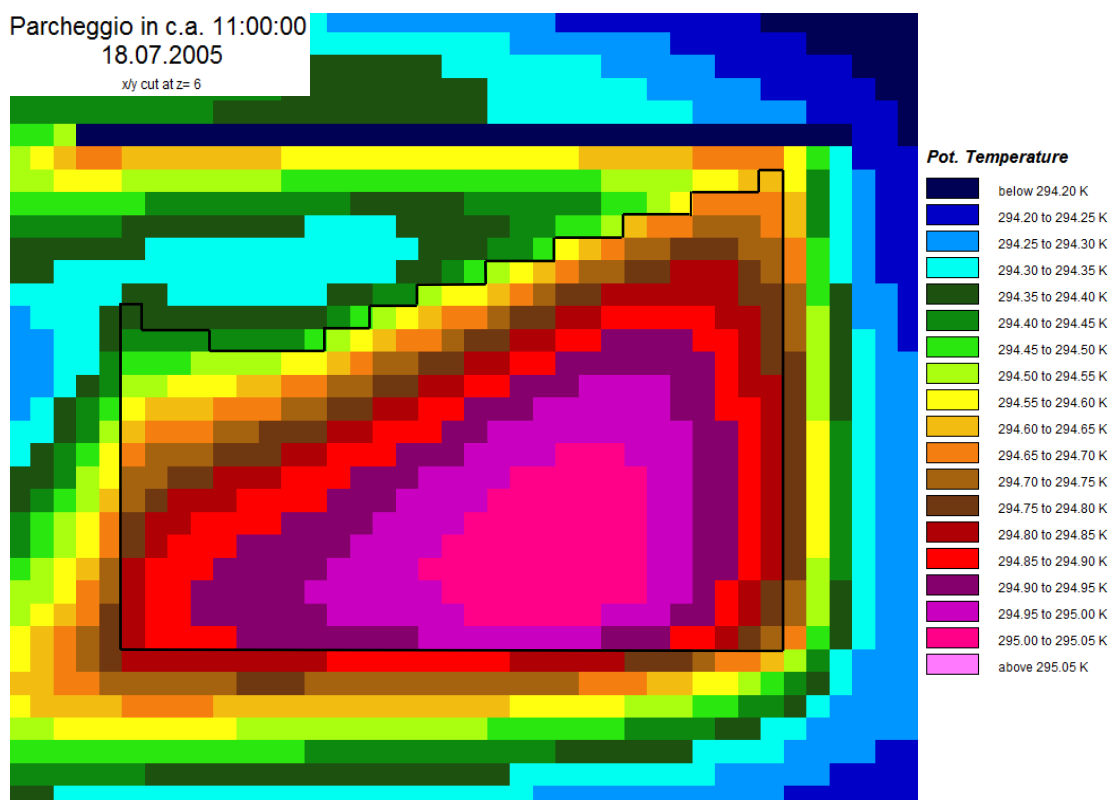


Figura 44: parcheggio in calcestruzzo, sezione orizzontale alla quota del parcheggio, distribuzione della temperatura potenziale

Dalle precedenti analisi si nota una distribuzione simile tra i due modelli della temperatura potenziale con valori compresi tra 21 °C e 23 °C corrispondenti a temperature dell'aria comprese tra 22°C e 24 °C. A causa dell'orientamento del parcheggio, infatti, la radiazione solare è maggiore in alcune zone situate a sud - est. In entami i casi la temperatura diminuisce all'aumentare della distanza dall'area avente la radiazione più alta. Si evidenzia, tuttavia, un campo di temperature più alto nel parcheggio in calcestruzzo.

6.7.3 La distribuzione della temperatura superficiale

Si valuta quindi la distribuzione della temperatura superficiale nel parcheggio. La temperatura superficiale è definita come la temperatura della superficie più esterna della sezione corrente del solaio del parcheggio. I valori numerici in legenda sono presentati in kelvin poiché è l'unica unità di misura disponibile nel software leonardo. Si ricorda che la relazione tra Kelvin e Celsius è:

$$T(^{\circ}C) = T(K) - 273,15$$

Si presentano successivamente i risultati grafici del modello rappresentante il parcheggio inerbito ed il parcheggio in calcestruzzo. Anche in questo caso viene effettuata una sezione orizzontale alla quota del parcheggio, ovvero 12 m sul livello del mare.



Figura 45: parcheggio inerbito, sezione orizzontale alla quota del parcheggio, distribuzione della temperatura superficiale

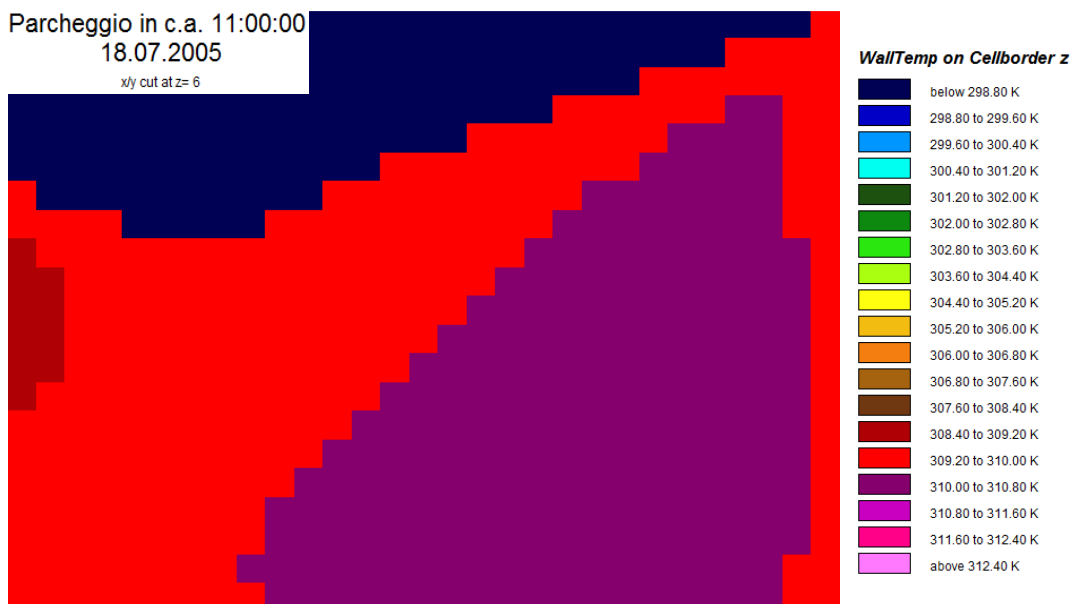


Figura 46: parcheggio in calcestruzzo, sezione orizzontale alla quota del parcheggio, distribuzione della temperatura superficiale

Dalle figura precedenti si deduce che la differenza di temperatura superficiale tra i due modelli è sostanziale: nel parcheggio in calcestruzzo la temperatura è quasi costante a circa 36 - 37 °C su tutta la superficie; nel parcheggio inerbito, invece, la temperatura superficiale varia notevolmente nell'area. Le superfici in calcestruzzo, infatti, denotano temperature comprese tra 38 °C e 39 °C; le superfici inerbite presentano temperature superficiali comprese tra 32 °C e 34 °C; presso superfici alberate infine si notano le temperature minori, con minimi di 28 °C, grazie all'ombreggiamento.

6.7.4 La distribuzione della leaf temperature

Si mostra infine la distribuzione della leaf temperature o temperatura superficiale di foglia nelle superfici verdi del parcheggio inerbito.

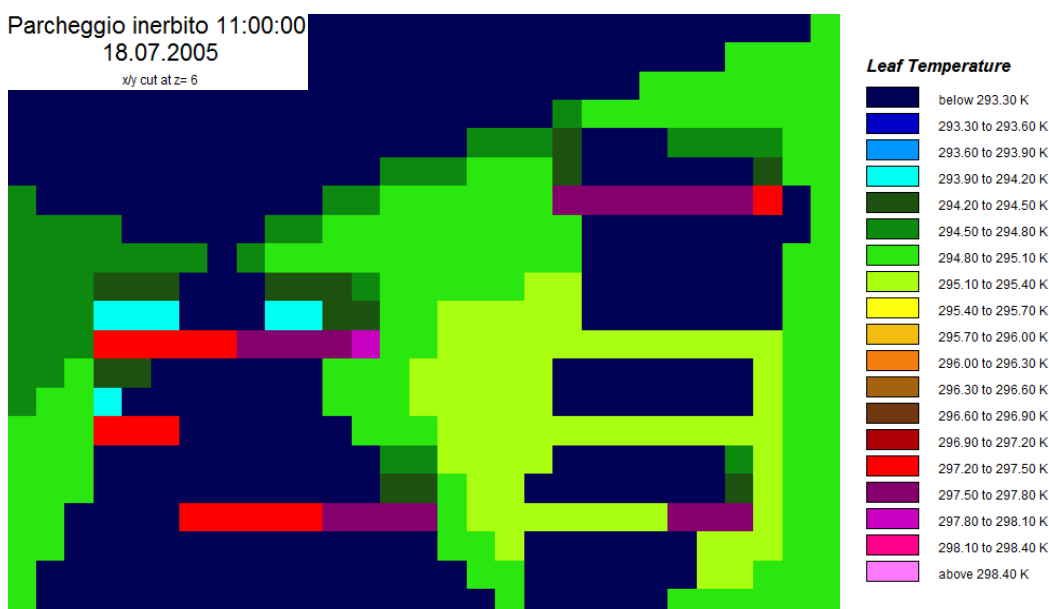


Figura 47: parcheggio inerbito, sezione orizzontale alla quota del parcheggio, distribuzione della leaf temperature

Si nota che la leaf temperature nelle superfici inerbite è circa 22 °C. Nelle superfici alberate invece vi sono notevoli variazioni di temperatura causati dall'ombreggiamento con valori compresi tra 21 °C e 24 °C.

La conoscenza della temperatura superficiale di foglia è di grande interesse. Oltre ad essere un'importante indicazione per la scelta della vegetazione, infatti, è necessaria per calcolare lo scambio termico tra la vegetazione e l'ambiente circostante. Il vento che agisce sull'intervento, infatti, lambisce le foglie ed è influenzato dalla loro temperatura superficiale.

7 CONCLUSIONI

7.1 Risultati ottenuti

In questo studio è stata effettuata un'analisi microclimatica di un parcheggio esterno situato nella località marittima di Bergeggi con l'obiettivo di quantificare l'incidenza della vegetazione nell'intervento. L'analisi è stata organizzata in due sezioni principali:

- il calcolo della temperatura delle varie superfici presenti nell'intervento tramite il software WUFI, considerando la radiazione solare incidente nel parcheggio calcolata mediante il programma Ecotect;
- la stima della distribuzione della temperatura dell'aria, della temperatura operante, della leaf temperature e della temperatura superficiale nell'area di intervento mediante una simulazione con il software ENVI-met.

I risultati principali di questo studio sono:

- l'incidenza dell'ombreggiamento della vegetazione nell'intervento è stata quantificata con una differenza di circa 5 °C tra le temperature superficiali medie annuali e una differenza di circa 25 °C tra le temperature superficiali massime;
- in media, la differenza di temperatura superficiale tra le superfici in calcestruzzo e le superfici inerbite durante l'ora più calda dell'anno è di 8 °C;
- l'abbassamento di temperatura nella vegetazione dovuto all'evapotraspirazione è pari a 7 °C durante l'ora più calda dell'anno.

7.2 Sviluppi futuri

Per migliorare la precisione dello studio effettuato si potrebbe discretizzare il modello in volumi più piccoli. Ottimi risultati si potrebbero ottenere con una griglia di 1 m x 1 m, considerando un'altezza del volume pari a 1 m. Ulteriori miglioramenti nel calcolo delle temperature superficiali possono essere ottenuti considerando l'incidenza delle effettive precipitazioni agenti nell'area e dell'acqua dell'impianto di irrigazione presente nelle aree verdi del parcheggio.

Con risultati ottenuti, inoltre, si potrebbe implementare un modello a parametri concentrati per determinare la temperatura interna dei veicoli nel parcheggio e stimare il risparmio di agenti inquinanti grazie alla vegetazione. Un'ulteriore approfondimento potrebbe essere il confronto tra un modello con ombreggiamenti prodotti da tendaggi e un modello con ombreggiamenti causati dalla vegetazione.

ALLEGATO B

Analisi mediante Envi-met: Configuration file

```
% ---- Basic Configuration File for ENVI-met Version 3 -----
% ---- MAIN-DATA Block -----
Name for Simulation (Text):           =Bergeggi parking
Input file Model Area                 =C:\ENVImetprojects\Models\Bergeggi.in
Filebase name for Output (Text):     =Bergeggi
Output Directory:                    =C:\ENVImetprojects
Start Simulation at Day (DD.MM.YYYY): =16.07.2005
Start Simulation at Time (HH:MM:SS): =06:00:00
Total Simulation Time in Hours:      =96.00
Save Model State each ? min         =60
Wind Speed in 10 m ab. Ground [m/s] =3
Wind Direction (0:N..90:E..180:S..270:W..) =12
Roughness Length z0 at Reference Point =0.1
Initial Temperature Atmosphere [K]   =293
Specific Humidity in 2500 m [g Water/kg air] =7
Relative Humidity in 2m [%]          =50
Database Plants                      =[input]\Plants.dat

[POSITION] _____ Where the area is located on earth
Longitude (+:east -:west) in dec. deg: =8.55
Latitude (+:northern -:southern) in dec.deg: =44.24
Longitude Time Zone Definition:       =15.00

[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

[TIMING] _____ Update & Save Intervalls
```

Update Surface Data each ? sec =30.0
Update Wind field each ? sec =900
Update Radiation and Shadows each ? sec =600
Update Plant Data each ? sec =600

[TIMESTEPS] _____ Dynamical Timesteps

Sun height for switching dt(0) -> dt(1) =40
Sun height for switching dt(1) -> dt(2) =50
Time step (s) for interval 1 dt(0) =10.0
Time step (s) for interval 2 dt(1) =5.0
Time step (s) for interval 3 dt(2) =2.0

[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

[CLOUDS] _____

Fraction of LOW clouds (x/8) =0
Fraction of MEDIUM clouds (x/8) =0
Fraction of HIGH clouds (x/8) =0

BIBLIOGRAFIA

Hamilton, D.C. and Morgan, W.R., 1952, *Radiant - interchange configuration factors*, NASA TN 2836;

Ronnen Levinson, Heng Pan, George Ban-Weiss, Pablo Rosado, Riccardo Paolini, Hashem Akbari, *Potential benefits of solar reflective car shells: Coller cabins, fuel savings and emission reductions*, Applied Energy 88 (2011);

Ronnen Levinson, Hashem Akbari, Effects of composition and exposure on the solar reflectance of Portland cement concrete, Cement and Concrete Research 32 (2002);

C. S. B. Grimmond, T. R. Oke, *Turbulent Heat Fluxes in Urban Areas: Observations and a Local Scale Urban Meteorological Parameterization Scheme (LUMPS)*, Journal of applied meteorology, 2002;

K. W. Oleson, G. B. Bonan, J. Feddema, M. Vertestein, C. S. B. Grimmond, *An Urban Parameterization for a Global climate Model. Part 1: Formulation and evaluation for Two Cities*, Journal of applied meteorology and climatology, 2007;

B. Offerle, C. S. B. Grimmond, T. R. Oke, *Parameterization of Net All-wave Radiation for Urban Areas*, Offerle et al. (August 2003);

Hartwaig M. Kunzel, *Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building components*, One and two dimensional calculation using simple parameters, Fraunhofer IRB Verlag Stuttgart, 1995;

Ronnen Levison, Hashem Akbari, Paul Berdahl, *Measuring solar reflectance – Part 1: defining a metric that accurately predicts solar heat gain*, Science Direct, 24 April 2010;

John H. Lienhard IV, John H. Lienhard V, *A Heat Transfer Textbook*, 22 January, 2011;

Autorità Portuale di Savona, *Bando di concorso di idee per la progettazione di opere ed interventi relativi alla zona di separazione tra le aree portuali ed il litorale nel terrapieno sud del bacino di Vado-Ligure Bergeggi*, 25 maggio 2011;

Paolo Abram, Giardini Pensili, *Coperture a verde e gestione delle acque meteoriche*, 2004;

Emanuele Bortolotti, *Il verde possibile*, 2005;

Künzel, H.M., *Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components. One- and two-dimensional calculation using simple parameters*, IRB Verlag 1995;

Bruse, M. (2004), *ENVI-met 3.0: Updated Model Overview*;

Jesionek, K. & Bruse, M., *Impacts of vegetation on the microclimate: modeling standardized building structures with different greening levels*, Institute of Geography, University of Bochum, Bochum, Germany;

Vallati A., *Analisi dell'influenza della vegetazione sul microclima urbano – valutazione dei risultati elaborate dal software Envi-met*, Dipartimento di fisica tecnica, Università La Sapienza, Roma, Italia.

Norme:

ISO 10456, *Building materials and products – Hygrothermal properties – Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values*, 15 December 2007;

ISO 13786, *Thermal performance of building components – Dynamics thermal characteristic – calculation methods*, 15 December 2007;

UNI EN ISO 13788: 2003, *Prestazione igrotermica dei componenti e degli elementi per edilizia - Temperatura superficiale interna per evitare l'umidità superficiale critica e condensazione interstiziale - Metodo di calcolo.*

Sitografia:

<http://www.envi-met.com> – Sito ufficiale del software di simulazione ENVI-met, contiene il manuale di istruzioni per l'utilizzo e alcuni documenti esplicativi dei modelli matematici applicati dal software;

<http://pandora.meng.auth.gr> – descrizione generale del software e delle sue proprietà tecniche e di applicazione;

www.nasa.gov;

www.energy.gov;

<http://amsglossary.allenpress.com>.