



## Ricerca di Sistema elettrico

Analisi del comportamento energetico di un  
fabbricato-tipo in assenza/presenza di  
tetto/parete verde per ottimizzare l'efficienza  
energetica degli edifici in area urbana

*Fabio Fantozzi, Carlo Bibbiani, Caterina Gargari*

## ANALISI DEL COMPORTAMENTO ENERGETICO DI UN FABBRICATO-TIPO IN ASSENZA/PRESENZA DI TETTO/PARETE VERDE PER OTTIMIZZARE L'EFFICIENZA ENERGETICA DEGLI EDIFICI IN AREA URBANA

Fabio Fantozzi (DESTEC, Università di Pisa), Carlo Bibbiani (DSV, Università di Pisa), Caterina Gargari (Collaborazione esterna Università di Pisa)

Settembre 2014

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2013

Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica

Progetto: Sviluppo di modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica sul patrimonio immobiliare pubblico

Obiettivo: Sviluppo di e caratterizzazione di schermature solari ad elevato contenuto tecnologico

Responsabile del Progetto: arch. Gaetano Fasano ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione *"Validazione di modelli di simulazione semplificati per il bilancio energetico dei fabbricati dotati di coltri vegetali"*

Responsabile scientifico ENEA: Carlo Alberto Campiotti

Responsabile scientifico Università di Pisa: Fabio Fantozzi

## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 LA GENERAZIONE DEL CALORE URBANO .....	5
2.1 LE FONTI DI CALORE .....	7
2.2 LA RADIAZIONE GLOBALE NETTA ( $Q^*$ ).....	8
2.3 I FLUSSI DI CALORE TURBOLENTI.....	9
2.4 IL FLUSSO DI CALORE VERSO IL SOTTOSUOLO (ACCUMULO).....	10
2.5 IL CALORE ANTROPOGENICO (QF).....	10
3 TECNICHE DI SIMULAZIONE E STIMA .....	10
3.1 LA MODELLAZIONE NUMERICA.....	10
3.2 IL BILANCIO ENERGETICO DELLA CITTÀ: IL MODELLO (TEB).....	11
3.3 L'USO DI ENERGYPLUS .....	12
3.4 IL MODULO TERRAIN DI ENERGY PLUS .....	12
3.5 IL MODELLO COMBINATO ENERGYPLUS / TEB.....	12
4 IL CASO STUDIO: EDIFICIO MULTIPIANO PER EDILIZIA RESIDENZIALE .....	14
4.1 RISULTATI DELLA SIMULAZIONE CON IL MODULO TERRAIN .....	15
5 CONCLUSIONI.....	24
6 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	25
7 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	28
CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO IMPEGNATO NELL'ATTIVITÀ.....	29

## Sommario

Nel presente Report viene presentato un ampio percorso bibliografico in cui si è cercato inizialmente di individuare una serie di parametri, condivisi dai vari Autori, che potevano costituire la base di partenza per l'utilizzo del software Energy Plus (modulo Terrain) ai fini di relazionare quanto sia da ritenersi benefica l'incidenza delle coltri vegetali per mitigare il fenomeno delle UHI (Urban Heat Island).

L'ampia bibliografia ha mostrato che i parametri a cui si possano attribuire responsabilità sul microclima delle grandi città, rispetto a quello rurale, sono molti e l'interazione fra essi gioca talvolta degli aspetti sinergici che non sempre sono prevedibili. L'intento del lavoro è stato dunque quello di partire per gradi iniziando ad esaminare per prima la temperatura superficiale che, in presenza/assenza di un tetto verde, e spostando le due suddette coperture dalla città alla campagna, può significativamente variare anche per la diversa incidenza della fluidodinamica indotta dai venti che giuoca un ruolo importante sui risultati.

La minore temperatura superficiale di un tetto verde legata alle sue caratteristiche di evapotraspirazione, che le coperture tradizionali non hanno, indica che questa strada è sicuramente interessante per dare risposta al problema che ci eravamo posti, anche se per incrementarne l'efficacia sembra risultare necessario indagare anche come si possano ridurre ulteriormente i flussi termici che già la ridotta temperatura superficiale lascia intravedere. In questo ci è sembrato di individuare un limite del programma Energy Plus che, tendenzialmente rivolto ad indagare gli effetti dell'ambiente esterno sul fabbricato, non sembra essere altrettanto efficace quando si vogliono invertire i due punti di vista, tenendo conto che, come precedentemente premesso, la letteratura indica altri comportamenti sinergici di sicura efficacia che dovranno essere inseriti e possibilmente analizzati.

## 1 Introduzione

I fenomeni di urbanizzazione e di industrializzazione hanno migliorato il livello di vita materiale e il nostro comfort, ma hanno anche causato molti problemi, come il riscaldamento globale, il problema dei rifiuti, e l'inquinamento atmosferico. Gli impatti globali negativi colpiscono più seriamente le aree urbane e, ovviamente, le aree industriali. La popolazione urbana è in continuo aumento, ed è stato stimato che il 48% della popolazione mondiale, ovvero tre miliardi di persone, vivono già in agglomerati urbani, e dovrebbe divenire cinque miliardi entro il 2030 (World Urbanization Prospectus, 2004).

Sono stati osservati due fenomeni principali nelle grandi città rispetto alle aree limitrofe: una temperatura, o contenuto di calore, più alto, detto 'isola di calore urbana' (UHI) e occasionalmente anche temperature più basse. Il contenuto di calore più alto è attribuito principalmente al calore di origine antropica liberato dai veicoli, dalle centrali elettriche, dai condizionatori e da altre fonti di calore, e a causa anche del calore immagazzinato e re-irradiato dalle grandi strutture. Enormi quantità di radiazione solare vengono infatti accumulate e re-irradiate nelle aree urbane a causa della grande massa dei fabbricati e del minore fattore di vista del cielo. Le aree urbane possiedono anche meno vegetazione, con particolare riferimento al tema del presente report. Un altro problema delle aree urbane è la presenza di numerosi ostacoli che riducono la rimozione del calore convettivo (venti, etc.).

E' stato suggerito, per ridurre l'alta intensità di calore dovuta a quanto sopra menzionato, di ridurre il rilascio di calore di origine antropica e apportare alcune modifiche adeguate, come ad esempio l'uso di materiali ad alto valore di albedo, i tetti freddi, i materiali da costruzione più idonei e una corretta progettazione degli edifici.

Gli effetti negativi della UHI includono il deterioramento dell'ambiente di vita, l'aumento del consumo di energia (Konopacki e Akbari, 2002), l'elevazione a livello del suolo del contenuto di ozono (Rosenfeld et al., 1998) e anche un aumento dei tassi di mortalità (Changnon et al., 1996). Il campo di studio dell' UHI è diventato di grande interesse per gli scienziati e gli ingegneri a causa dei numerosi impatti ambientali ed economici negativi sulla società, e dei promettenti benefici connessi con la sua attenuazione.

Una revisione della letteratura pertinente ha rivelato che una misura attenuante della UHI è la realizzazione di aree verdi con abbondante vegetazione (Tong et al, 2005; Ca et al, 1998; Ashie et al, 1999; Yu e Hien, 2006), anche se le misure di mitigazione proposte coprono molti altri campi. Konopacki e Akbari (2002) hanno riferito che, mitigando gli effetti dell'UHI ad Houston, è stato possibile raggiungere un risparmio di 82 milioni di dollari, con una riduzione di potenza di picco di 730 MW, e con una diminuzione annua di 170000 tonnellate di emissioni di anidride carbonica. Rosenfeld et al. (1998) hanno affermato che il livello di ozono potrebbe superare le 120 parti per miliardo a 22 °C, e potrebbe raggiungere 240 parti per miliardo a 32 °C. Essi hanno usato una tecnica di simulazione numerica e hanno previsto per gli Stati Uniti, dal 2015, una riduzione annua di energia elettrica di 25GW ed un potenziale risparmio di 5 miliardi di dollari . Questo calcolo potrebbe rivelarsi esatto perché i possibili benefici derivanti dalla riduzione dell' UHI sono enormi: la comunità di ricerca ha svolto un'ampia attività in questo campo e quindi è disponibile una grande quantità di letteratura. Tuttavia, a causa delle tipiche condizioni complesse delle città, sono raramente disponibili dei metodi semplici per la comprensione, la quantificazione e la mitigazione dell' UHI (Rizwan et al., 2008).

## 2 La generazione del Calore Urbano

L'UHI è dovuto all'effetto combinato di molti fattori che possono essere classificati sia come fattori controllabili che come incontrollabili. I suddetti fattori possono ulteriormente essere classificati come:

- variabili ad effetto temporaneo, come la velocità dell'aria e la copertura nuvolosa,
- variabili ad effetto permanente, quali le aree verdi, i materiali da costruzione, ed il fattore di vista del cielo
- variabili ad effetto ciclico, come la intensità della radiazione solare e le fonti di calore antropiche.

Il calore generato ed immagazzinato in una zona proviene dal Sole sotto forma di radiazioni solari ed anche dalle centrali elettriche, dalle automobili, dai condizionatori d'aria e altre fonti, come calore di origine antropica. Quasi tutto il calore di origine antropica entra nell'ambiente immediatamente e direttamente. D'altra parte, solo una frazione delle radiazioni solari riscalda direttamente l'ambiente; il resto viene assorbito dalle complesse costruzioni urbane che riscaldano l'ambiente indirettamente.

Le strutture a livello del suolo, quali i muri, le falde dei tetti, i giardini irrigati, gli spazi verdi non irrigati, i prati e le aree pavimentate, ecc., catturano la radiazione solare in misura diversa. Queste strutture naturali e artificiali assorbono continuamente e immagazzinano questa radiazione solare sotto forma di energia termica, dal sorgere del sole fino al tardo pomeriggio.

Successivamente, il Sole inizia a calare e l'energia termica, immagazzinata nelle strutture, viene poi rilasciata nell'ambiente. Il modo e la quantità di calore rilasciata dalle strutture urbane, tuttavia, dipende da altri fattori controllabili, come il fattore di vista del cielo e il tipo di materiale da costruzione. In una tipica area urbana, i materiali da costruzione (in termini di remissività) sono dotati di grande massa e sono caratterizzati da una geometria 'compatta', che cattura un'alta intensità di radiazione solare. In città, la capacità di rilasciare calore per mezzo di radiazione ad onda lunga è ridotta a causa della diminuzione del fattore di vista del cielo: ciò si traduce in un forte accumulo di calore nelle strutture edilizie.

Si ritiene che in città l'albedo, la luce riflessa rispetto alla luce incidente, sia anche molto bassa a causa di configurazioni tipiche quali le 'strade-canyon', e che questo sia uno dei principali motivi delle temperature elevate. I valori di progetto di albedo e del fattore di vista del cielo vengono, quindi, riportati come due fattori importanti per la formazione dell' UHI (Giridharan et al., 2004).

A causa della mancanza di vegetazione in città, si rileva anche un basso trasferimento di energia tramite calore latente di vaporizzazione. E' stato calcolato che l'evapotraspirazione a Tokyo si è ridotta del 38% negli anni dal 1972 al 1995 (Kondoh e Nishiyama, 1999). Lo stato superficiale delle pareti degli edifici e i numerosi ostacoli che essi presentano nelle aree urbane riducono la quantità di calore convettivo rimosso dal vento. Le caratteristiche proprietà termiche di alcuni dei materiali da costruzione utilizzati nelle aree urbane, come la bassa emissività, sono altre potenziali cause. Si ritiene inoltre che le sostanze inquinanti, in particolare gli aerosol che sono abbondanti nelle aree urbane inquinate, siano in grado di assorbire e ri-emettere radiazione ad onda lunga e di inibire il corrispondente raffreddamento radiativo delle superfici producendo un pseudo effetto-serra, che va ad aumentare così l'UHI (Rizwan et al., 2008).

Il fenomeno del UHI sembra essere anche influenzato da variabili ad effetto temporaneo. Pongracz et al. (2006) hanno riportato che le condizioni anticicloniche aumentano l'intensità della isola di calore urbana (UHII). Molti studi hanno riportato l'influenza della velocità del vento e della copertura nuvolosa sull' UHI: i risultati mostrano che l'UHI è negativamente correlato con la velocità del vento e la copertura nuvolosa (Kim e Baik, 2005; Oke, 1982). D'altra parte è stato riportato che l'UHI è correlato positivamente con la popolazione. Hung et al. (2005) hanno studiato l'UHI in dodici megalopoli asiatiche e hanno riferito che l'entità e la portata dell'UHI è positivamente correlata con la popolazione della città.

Kim e Baik (2004), invece, non hanno trovato la stessa correlazione con la popolazione. Hung et al. (2005) hanno osservato un valore di UHII massimo di 8 °C a Bangkok, con una popolazione di 11 milioni, ed un massimo di UHII di 7 °C, con una densità di popolazione di 12.550.000 a Shanghai. Essi hanno anche riferito un massimo UHII di 7 °C a Manila, con una densità di popolazione di 15617 (abitanti/km<sup>2</sup>) e un massimo UHII di 12 °C, con una densità di popolazione di soli 6218 (abitanti/km<sup>2</sup>) a Tokyo. La popolazione potrebbe avere effetti dupli sulla generazione di calore: un effetto diretto, poiché più persone implicano più calore metabolico generato ed immesso nell'ambiente; ed un effetto indiretto poiché il numero di edifici, veicoli, fabbriche ecc., saranno probabilmente maggiori a causa dell'aumento della popolazione. Tuttavia, le variabili già indicate come il fattore di vista del cielo, il calore di origine antropica, la progettazione degli edifici ed i materiali ecc., giocano probabilmente un ruolo altrettanto importante nell' aumento del contenuto di calore. Questi fattori non sono dipendenti dalla popolazione e possono sia favorire che ostacolare l'aumento del contenuto di calore. Pertanto la popolazione (densità di popolazione sarebbe più appropriato) potrebbe, ma non necessariamente, aumentare il contenuto di calore di un territorio. Poiché l'UHI sembra una risposta combinata di molti fattori, il confronto dovrebbe tener conto di tutti i fattori controllabili, e non essere limitato quindi solo alla popolazione o a qualsiasi altro fattore singolo, anche se

non è sempre facile far interagire le tante variabili in gioco per cui diversi autori sembrano soffermarsi su alcuni di questi parametri in modo particolare.

Un confronto di fattori controllabili e del relativo UHII per diverse aree potrebbe contribuire a quantificare l'importanza dei vari fattori, vale a dire la sensibilità delle variabili individuali sull'UHI, e in questa ottica si è infatti provato nel presente report ad indagare il tema del 'Green-roof'. Analogamente, ci sono state alcune ricerche sulla quantificazione della significatività delle sole variabili ad effetto temporaneo come ad esempio la velocità del vento. Lo studio condotto da Kim e Baik (2002) ha riferito che una diminuzione del massimo di UHI potrebbe essere apprezzabile con velocità del vento superiore a 0,8 m/s, mentre con una velocità critica del vento di 7,0 m/s, la diminuzione massima di UHII è 0,3 °C o anche minore. In un altro studio Klysik e Fortuniak (1999) hanno riportato che un UHI superiore di 1 °C potrebbe essere osservato quando la velocità media del vento in città è di 4 m/s, durante la notte, e 2 m/s durante il giorno. Morris et al. (2001) riportarono che il UHII è proporzionale alla radice quarta sia della velocità del vento che della copertura nuvolosa.

Si è visto dunque che l'UHII è un indicatore importante per valutare la gravità della urbanizzazione di un'area. Tuttavia, esso mette poco in risalto il ruolo del calore generato da varie fonti. Il bilancio dell'energia superficiale (Surface Energy Balance, SEB), che dà un'idea del calore generato e contenuto in una zona, può sicuramente aiutare nella comprensione del fenomeno (Rizwan et al., 2008).

Questo parametro viene determinato come la differenza di temperatura media, calcolata spazialmente, tra una città e la sua area rurale circostante (Magee et al, 1999; Kim e Baik, 2005). Questo concetto, tuttavia, copre una gamma di idee diversificate che comprendono la differenza di temperatura tra la zona urbana ben sviluppata e la zona meno sviluppata, o tra due diversi centri abitati. Wong e Yu (2005) hanno riportato un UHII massimo di 4 °C tra un' area a grande sviluppo vegetale e l'area più abitata del quartiere centrale degli affari di Singapore. Giridharan et al. (2004, 2005) hanno calcolato un UHII con valori a partire da 0,4 °C e fino a 1,5 °C all'interno di e fra tre aree di complessi residenziali a Hong Kong. Gli UHII riportati sono basati sulla differenza tra la temperatura dell'aria e della superficie, le quali hanno mostrato andamenti diversi. È stato riferito che gli UHII erano alti durante la notte o la mattina presto, e bassi durante il giorno (Kim e Baik, 2005; Jauregui, 1997; Lemonsu e Masson, 2002; Montavez et al, 2000; Klysik e Fortuniak, 1999). Lo UHII riportato varia da zona a zona e secondo il metodo per il calcolo. Saitoh et al. (1995) hanno raccolto dati meteo con un'automobile e riportato dei valori di UHII, basati sulla temperatura superficiale, di 8 °C a Tokyo, mentre Hung et al. (2005) hanno utilizzato dati satellitari per evidenziare un UHII massimo basato sulla temperatura superficiale di 12 °C a Tokyo. Hafner e Kidder (1999) hanno modellizzato e calcolato valori di UHII basati sulla temperatura superficiale di 1,2 °C, e UHII basati sulla temperatura dell'aria di soli 0,6 °C ad Atlanta, USA.

Kim e Baik (2005), utilizzando i dati di stazioni meteo, hanno riferito valori massimi di UHII di 3,4 °C basati sulla temperatura dell'aria a Seoul, mentre Hung et al. (2005) valori di UHII di 8 °C basati sulla temperatura superficiale a Seoul, usando dati satellitari. Magee et al. (1999) hanno riferito valori massimi di UHII basati sulla temperatura dell'aria di 1 °C a Fairbanks, in Alaska, mentre Klysik e Fortuniak (1999) valori di 12 °C in Polonia, entrambi utilizzando dati di stazioni meteo.

La maggior parte delle analisi su base annuale hanno anche riferito una massima differenza di temperatura in notti serene e poco ventose (Kim e Baik, 2004, 2005). Sebbene l'UHII sia stato definito come la differenza di temperatura tra aree urbane e rurali, è stato anche utilizzato per valutare la variazione di temperatura nel tempo. In uno di tali studi, vari UHII sono stati determinati a Tokyo come variazione di temperatura il 1930 e il 1990 (Mochida et al., 1997). In un altro approccio la temperatura media attuale è stata sottratta dalla temperatura media del passato, sia per le aree urbane che per quelle rurali: la differenza della temperatura modificata viene poi definita come UHII (Magee et al., 1999).

## 2.1 Le Fonti di Calore

Il calore generato da e contenuto in una zona può essere espresso nel Surface Energy Balance (SEB), come indicato di seguito (Oke, 1988):

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A$$

dove,

- $Q^*$  è la radiazione netta globale,
- $Q_F$ ,  $Q_E$  e  $Q_H$  sono rispettivamente il rilascio di calore di origine antropica, il flusso in regime turbolento di calore sensibile e latente,
- $\Delta Q_S$  è l'accumulo di calore sensibile
- $\Delta Q_A$  è la differenza di energia scambiata per convezione nel volume di controllo (Fig. 1).

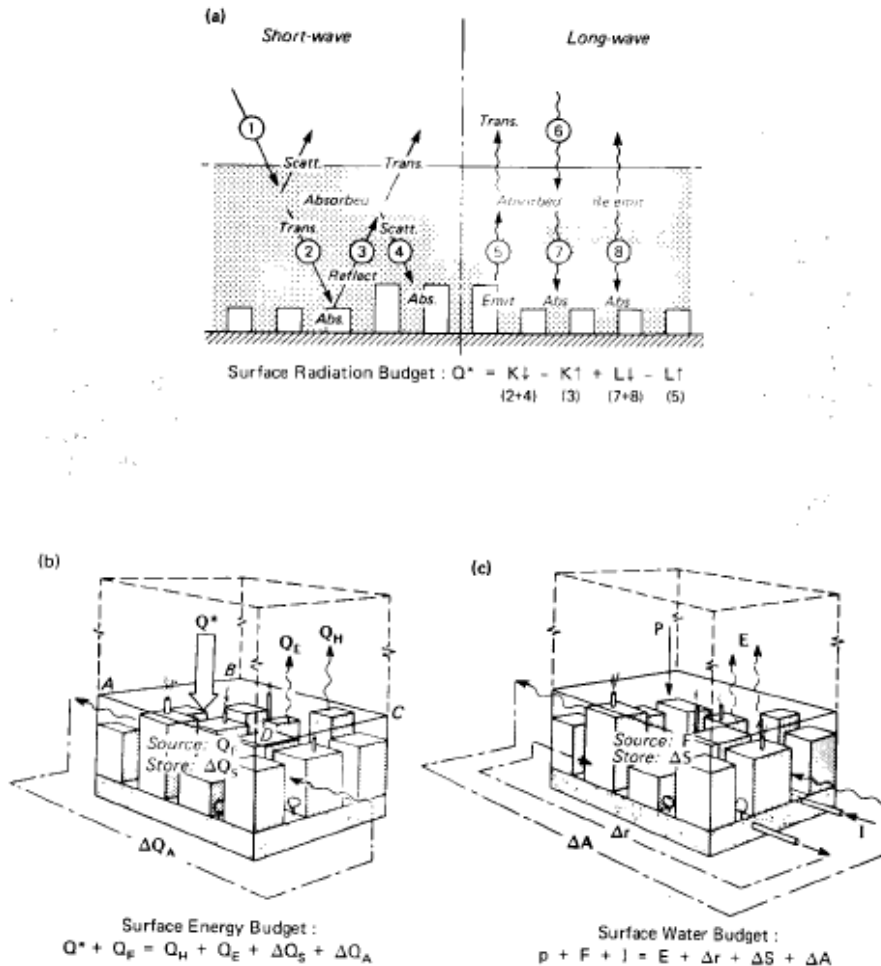


Fig. 1. Schemi del bilancio energetico con i relativi termini coinvolti (Oke, 1982).

## 2.2 La radiazione globale netta ( $Q^*$ )

Questa parte del bilancio energetico rappresenta la radiazione ad onda corta e lunga catturata da una determinata zona. Entrambi i tipi di radiazione possono essere misurati utilizzando idonei sensori di misura; la radiazione netta globale potrebbe quindi essere calcolata come la differenza tra i valori in entrata e in uscita (Brotzge e Crawford, 2003; Christen e Vogt, 2004). E' stata segnalata una attenuazione della radiazione solare ad onda corta in arrivo a causa della coltre di fumo sulle aree urbane (Sang et al, 2000; Oke, 1988). L'attenuazione ha raggiunto anche il 33% in alcuni casi (Stanhill e Kamala, 1995) ed è stato anche segnalato come causa di diminuzione di temperatura (Sang et al., 2000). In altre aree, invece, l'attenuazione non è stata osservata (Christen e Vogt, 2004).

È stato riferito che l'attenuazione della radiazione a onde corte in ingresso viene compensata da un'albedo minore relativamente alle radiazioni ad onde corte in uscita e l'aumento della radiazione ad onda lunga in entrata viene compensata da un aumento delle radiazioni ad onda lunga uscenti a causa della elevata



emissività superficiale legata alla maggiore temperatura. E' stato riferito come la maggior parte della quantità attenuata venga diffusa e ricevuta di nuovo, e la differenza netta tra le aree urbane e rurali non possa essere superiore al 5% (Oke, 1982, 1988; Rizwan et al., 2008) .

**Tab. 1. Valori tipici di albedo ed emissività infrarossa**

copertura del terreno	valori tipici di albedo		valori tipici di emissività infrarossa
	estiva	invernale	
terreni agricoli	0.17	0.23	0.92
terreni erbosi	0.19	0.23	0.92
foreste decidue	0.16	0.17	0.93
foreste di conifere	0.12	0.12	0.95
aree umide	0.14	0.14	0.95

### 2.3 I flussi di calore turbolenti

I Flussi turbolenti di calore tipici delle UHI comprendono sia la componente sensibile che quella latente. La turbolenza è una caratteristica fondamentale dello strato limite e consiste nella presenza di vortici e onde, di dimensioni variabili da pochi millimetri a più di un chilometro, che interagiscono fra loro. La turbolenza è responsabile del trasporto verticale (cioè dello scambio tra suolo e atmosfera e tra quote diverse all'interno dello strato limite) di: energia termica, energia meccanica, umidità, anidride carbonica, inquinanti. Si parla dunque di flussi turbolenti e di diffusione turbolenta. Per misurare e analizzare la turbolenza nello strato limite (è il campo di ricerca della micrometeorologia) occorrono strumenti sofisticati (p.es. l'anemometro ultrasonico) in grado di realizzare misure ad alta frequenza (decine di misure ogni secondo), da elaborare poi con specifiche metodologie (p.es. il metodo della correlazione turbolenta o eddy covariance) (Rizwan et al., 2008).

Le aree urbane densamente edificate sono ritenute essere responsabili di un aumento del flusso di calore sensibile che viene correlato alla superficie costruita (Oke, 1988). L'intensità del flusso di calore latente, invece, varia da situazione a situazione, come hanno concluso Hafner e Kidder (1999). Grimmond (1992) ha descritto il flusso di calore latente come il valore maggiore all'interno del calcolo del Surface Energy Balance (SEB), mentre Masson (2000) lo ha trascurato nel suo schema di bilancio energetico della città. Anche se potrebbe sembrare che il flusso di calore latente sia basso quando siamo in presenza di una zona urbanizzata con scarsa vegetazione, esso acquista una sicura rilevanza in alcune parti della città ad alta vegetazione. Esiste in proposito un parametro detto rapporto di Bowen, rapporto tra flusso di calore sensibile e flusso di calore latente, che sta ad indicare la diversa incidenza dei due per varie coperture del terreno (vedi Tab. 2). Esso viene indicato come un parametro significativo poiché la sua riduzione (che significa trasformare parte del flusso sensibile in latente) può contribuire a modificare il bilancio energetico superficiale contribuendo alla mitigazione dell'UHI.

E' stato riferito che i flussi di calore turbolenti variano rispetto a  $Q^*$  (Arnfield e Grimmond, 1998; Offerle et al, 2006). La conduttanza termica e disponibilità di umidità del terreno sono ritenuti essere altri fattori importanti per quantificare i flussi turbolenti di calore (Oke, 1988).

**Tab. 2. Valori tipici del rapporto di Bowen.**

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

## 2.4 Il flusso di calore verso il sottosuolo (accumulo)

Christen e Vogt (2004) hanno riferito che, a causa della complessa configurazione dei materiali di superficie, degli orientamenti e delle loro interazioni, è quasi impossibile effettuare la misura diretta del flusso di calore di accumulo in una zona urbanizzata. Il termine è dunque di solito modellizzato o determinato come resto dell'equazione di Surface Energy Balance (SEB) (Rizwan et al., 2008). Si dice che un aumento della radiazione netta globale aumenti direttamente il flusso di calore immagazzinato. A riguardo, Grimmond (1992) conferma un aumento di circa il 60% nella media mensile del rapporto diurno del flusso di calore immagazzinato rispetto alla radiazione netta globale.

## 2.5 Il calore antropogenico ( $Q_F$ )

Il calore antropogenico rappresenta il calore generato da fonti fisse e mobili di un territorio, convertito come se risultasse una radiazione incidente ( $W/m^2$ ) (Christen e Vogt, 2004). Questo componente è stato modellizzato come la somma del calore generato dagli edifici, dai veicoli e dalle persone (Sailor e Lu, 2004; Grimmond, 1992), o come il residuo di altri termini (Christen e Vogt, 2004). I valori riportati di questo termine variano notevolmente da zona a zona. Christen e Vogt (2004) hanno riportato valori di calore antropogenico di  $5-20W/m^2$  per Basilea, Svizzera, mentre Offerle et al. (2005) e Steinecke (1999) hanno riportato valori di calore antropogenico di  $32$  e  $35 W/m^2$  per Lodz, Polonia, e Reykjavik, Islanda, rispettivamente. Sailor e Lu (2004) hanno riportato un valore di calore antropogenico di  $60 W/m^2$  in estate e  $75 W/m^2$  in inverno, per sei grandi città degli USA, mentre Ichinose et al. (1999) riferisce di  $200 W/m^2$  in estate e  $400 W/m^2$  in inverno, e anche del più alto valore di  $1590W/m^2$  a Tokyo (Rizwan et al., 2008).

**Tab. 3. Flussi antropogenici di calore in alcune aree urbane, medie annuali (Oke 1982).**

area urbana	latitudine	anno	$Q_F (W/m^2)$	$Q_F/Q^*$
Manhattan	40°N	1965	159	1.71
Mosca	56°N	1970	127	3.02
Montreal	45°N	1961	99	1.90
Budapest	47°N	1970	43	0.93
Hong Kong	22°N	1971	33	0.30
Osaka	35°N	1970-74	26	-
Los Angeles	34°N	1965-70	21	0.19
Berlino Ovest	52°N	1967	21	0.37
Vancouver	49°N	1970	19	0.33
Sheffield	53°N	1952	19	0.34
Fairbanks	64°N	1967-75	6	0.33
area urbana tipica alle medie latitudini	33° - 66°N		15 - 50	0.1 - 1.0

## 3 Tecniche di simulazione e stima

### 3.1 La Modellazione numerica

Un'ampia bibliografia indica come la modellazione numerica sia un altro importante strumento di supporto con una vasta area di applicazioni di successo nello studio dell'UHI. Le applicazioni di questo strumento di supporto consentono la determinazione della influenza di importanti fattori quali la velocità del vento, il rilascio di calore di origine antropica, e le proprietà termiche, come l'albedo, il calore sensibile e il calore latente. Lemonsu e Masson (2002) hanno utilizzato dei modelli numerici e hanno riferito che la conduzione del calore negli edifici è il contributo più significativo nel Surface Energy Balance (SEB). anche Arnfield e

Grimmond (1998) hanno utilizzato modelli numerici e hanno riferito che le proprietà termiche della parete e il rapporto tra l'altezza dell'edificio e la distanza di separazione hanno l'influenza più importante nel SEB. Ashie et al. (1999) hanno utilizzato tecniche di modellazione numerica e hanno riferito che il rilascio di calore artificiale lungo l'edificio da parte dei condizionatori d'aria è di 0,5 °C. Dupont et al. (2004) hanno determinato i flussi di calore sensibile e latente mediante la modellazione numerica. Yamda (2000) ha calcolato l'albedo, il rilascio di calore di origine antropica, e le distribuzioni di umidità del suolo. Kato e Yamaguchi (2005) hanno riportato l'andamento del rilascio di calore di origine antropica. Takahashi et al. (2004) hanno predetto la temperatura dell'aria, il flusso di calore e l'umidità. Il modello di Hung et al. (2005) può anche prevedere la temperatura, l'umidità e la velocità del vento. Masson et al. (2000, 2002) hanno presentato e validato uno schema dettagliato di bilancio energetico. Sebbene l'applicazione di modellazione numerica sembra coprire una vasta area, si precisa che l'affidabilità dei modelli numerici per la stima del clima urbano non è stata completamente convalidata. In particolare, le proprietà delle superficie non sono state adeguatamente incorporate nei modelli numerici (Oke, 1988; Arnfield, 2003) (Rizwan et al., 2008). C'è però da sottolineare che molti dei dati indicati (temperatura superficiale, albedo, entità della evaporazione, etc.) sono riscontrabili attraverso dati satellitari come indicato da molti autori. Un esempio è lo studio condotto da Voogt e Grimmond (2000) che hanno determinato il flusso di calore sensibile in Canada attraverso dati telerilevati di temperatura delle superfici. Kondoh e Nishiyama (1999) hanno studiato con la tecnologia spaziale le variazioni di evaporazione in Giappone. I parametri di superficie, come albedo, e le proprietà del suolo, sono stati determinati da Hafner e Kidder (1999) con dati satellitari del radiometro ad altissima risoluzione (AVHRR).

### *3.2 Il bilancio energetico della Città: il Modello (TEB).*

Il modello TEB (Masson 2000) è un modello fisico basato sul concetto di canopy urbana che rappresenta gli effetti fluidodinamici e termodinamici di un'area urbanizzata sull'atmosfera. Il modello TEB è stato validato con osservazioni in vari siti urbani e sotto differenti condizioni meteorologiche (Masson et al 2002; Lemonsu et al 2004; Offerle et al 2005; Pigeon et al 2008.). Il modello considera un'approssimazione bidimensionale di un canyon urbano formato da tre superfici generiche: un muro una strada e un tetto, e calcola le condizioni climatiche, i flussi di energia di una città o di un quartiere formato da canyon urbani identici, dove sono possibili tutti gli orientamenti e tutti gli stati esistono con la stessa probabilità. Il modello TEB implementa una semplice rappresentazione di processi energetici dei fabbricati risolvendo un'equazione di conduzione di calore transitoria attraverso una parete multistrato e il tetto. All'interno del software, il metodo 'force restore' viene applicato per calcolare le condizioni interne dovute ai contributi delle diverse superfici edilizie. Ulteriori sviluppi del modello TEB includono una soglia minima per il calcolo dei carichi termici dell'edificio associata con la trasmissione attraverso le superfici del fabbricato (Pigeon et al. 2008). Altri fenomeni, come la trasmissione attraverso le finestre, gli incrementi di calore interni, l'infiltrazione e il calcolo dei carichi di raffreddamento non sono ancora inclusi nel modello (Bueno et al., 2011).

Un ulteriore passo nel rappresentare gli effetti degli edifici sul clima urbano è stato compiuto da Kikegawa et al. (2003), che ha implementato un modello energetico semplificato di un edificio con una parametrizzazione a canopy urbana, per i modelli su mesoscala. Oltre a risolvere l'equazione di diffusione per le pareti, questo modello tiene conto delle fonti interne di calore, della radiazione solare trasmessa attraverso le finestre e dei carichi di energia dovuti alla ventilazione. Applicando un bilancio del calore sensibile e latente, il modello calcola il fabbisogno energetico necessario per mantenere determinate condizioni interne. Recentemente, Salamanca et al. (2010) hanno sviluppato un nuovo modello energetico dell'edificio, accoppiato con un modello multistrato a canopy urbana (Martilli et al. 2002). Questo modello permette la definizione di edifici a più piani e incorpora una trattazione più dettagliata delle finestre, compreso il calcolo della radiazione solare trasmessa in funzione dell'angolo di incidenza. Può anche essere specificata in questo modello una gamma di condizioni di comfort ed una capacità massima del sistema HVAC. HVAC indica l'acronimo di Heating Ventilation and Air Conditioning, ovvero Riscaldamento,

ventilazione e condizionamento dell'aria. I modelli energetici dei fabbricati di Kikegawa e Salamanca sono in grado di simulare i principali processi di trasferimento di calore che si verificano all'interno degli edifici (Salamanca et al. 2010). Essi sono anche in grado di prevedere il fabbisogno energetico di un edificio e la configurazione di base per stimare le emissioni dovute al consumo di energia e di calore di scarto di un sistema HVAC (Ihara et al 2008;. Salamanca e Martilli 2010). In generale, queste parametrizzazioni dei fabbricati sono state sviluppate all'interno della comunità dei climatologi urbani (Bueno et al., 2011).

### 3.3 L'uso di EnergyPlus

E' noto che EnergyPlus (Crawley et al., 2001) rappresenta un modello energetico riconosciuto per il calcolo del fabbisogno energetico degli edifici, realizzato attraverso l'applicazione di un metodo di equilibrio termico (DOE 2010a), in qualche modo simile a quello utilizzato nelle parametrizzazioni dei fabbricati di cui sopra. Esso implementa anche modelli dettagliati per il calcolo del flusso termico, come nel caso della convezione, della radiazione solare (comprese le ombre e riflessi) e dello scambio di radiazione ad onda lunga con il cielo (DOE2010a).

EnergyPlus è stato ampiamente valutato in accordo agli standard di simulazione (ad esempio DOE 2010b, c). Una differenza rispetto alle parametrizzazioni dei fabbricati è che EnergyPlus è in grado di calcolare il consumo di energia di un sistema HVAC specifico, risolvendo le trasformazioni di energia sensibile e latente di un fluido di lavoro (aria o acqua) quando questo passa attraverso le diverse componenti HVAC (batterie, ventilatori, riscaldamento e impianto di raffreddamento, umidificatori, ecc). La potenzialità del sistema dipende dalle condizioni all'interno e all'esterno dell'edificio, e ci sono situazioni in cui il sistema non è a volte in grado di fornire l'energia necessaria, e quindi le condizioni ideali interne risulteranno compromesse.

Alla luce delle indicazioni precedenti, è stato possibile simulare con il programma Energy Plus quale possa essere la reale incidenza di un Green-Roof rispetto ad una copertura tradizionale isolata sulla mitigazione dell'effetto isola di calore (UHI).

### 3.4 Il modulo Terrain di Energy Plus

Il modulo Terrain di Energy Plus consente di definire il diverso scenario geografico di localizzazione dell'edificio; sembra abbastanza evidente che tale differenziazione possa legarsi al parametro Rapporto di Bowen, precedentemente definito ed anche alla diversa Albedo delle superfici.

La configurazione del sito in cui è collocato l'edificio oggetto di simulazione condiziona inoltre la risposta dell'edificio alla esposizione ai venti dominanti. In aggiunta, alle diverse configurazioni possibili sono associati diversi coefficienti di trasmissione del calore.

**Tabella 4 descrizione delle possibili configurazioni del sito disponibili nel modulo Terrain di EnergyPlus.**

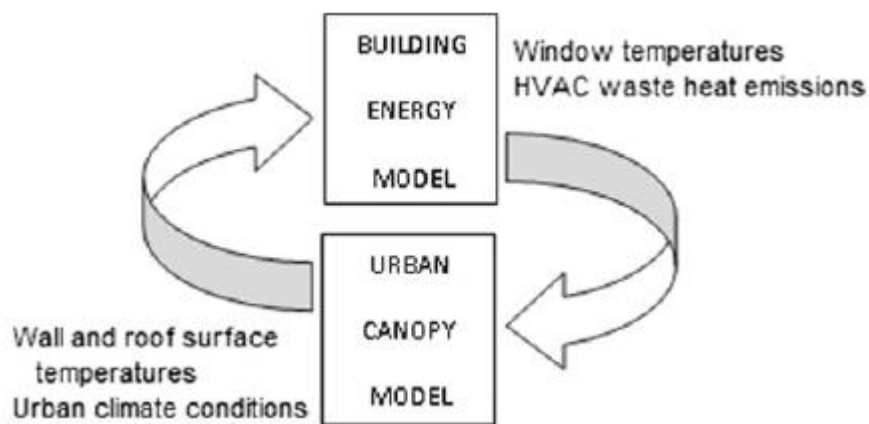
Sito	Descrizione
<i>Country</i>	Pianeggiante, campagna aperta
<i>Suburbs</i>	Campagna con boschi, area agricola collinare, area suburbana
<i>City</i>	Citta, aree centrali di grandi insediamenti urbani, sobborghi urbani
<i>Urban</i>	Area urbana, area industriale, foresta
<i>Ocean</i>	Oceano, aree costiere pianeggianti

### 3.5 Il modello combinato EnergyPlus / TEB

Da quanto descritto in precedenza, emerge la possibilità di combinare i due modelli precedentemente descritti , EnergyPlus e il modello TEB, al fine di calcolare il rendimento energetico degli edifici e il clima urbano intorno agli edifici, tenendo conto delle interazioni reciproche tra i due.

Sia EnergyPlus che il modello TEB sono infatti in grado di calcolare la temperatura della parete e della superficie del tetto esterno. Nello schema accoppiato, queste temperature di superficie possono essere calcolate da TEB e poi utilizzate in EnergyPlus come condizioni al contorno, poiché EnergyPlus semplifica il calcolo della radiazione a onda lunga tra una superficie dell'edificio e le superfici urbane circostanti, assumendo che queste ultime sono alla temperatura dell'aria esterna. Anche le correlazioni di scambio termico convettivo di una parete (CHTC) differiscono tra i due modelli. Palyvos (2008) ha presentato una revisione della letteratura relativa ai CHTC applicate alle superfici dei fabbricati, e ha proposto una correlazione generica più simile a quello utilizzato all'interno del modello TEB (Masson 2000) rispetto a quello utilizzato in EnergyPlus (DOE 2010a).

Lo schema accoppiato utilizza un metodo iterativo per calcolare le interazioni tra EnergyPlus e il modello TEB. Il processo di accoppiamento iterativo parte da una simulazione preliminare TEB utilizzando informazioni meteorologiche off-line (per i dettagli, vedere Masson et al. 2002). Le temperature di parete, del tetto, le temperature e le condizioni climatiche dei canyon urbani calcolati dal TEB sono poi fornite come condizioni al contorno per una simulazione in EnergyPlus. Successivamente, le temperature delle finestre e delle emissioni di calore di scarto HVAC, calcolati da EnergyPlus, sono utilizzati in una nuova iterazione di TEB.



**Fig. 14. Metodo iterativo del sistema accoppiato (Bueno et al., 2011).**

Il modello energetico dell'edificio (EnergyPlus) calcola le temperature delle finestre e rilascio di calore residuo dai sistemi HVAC. Il modello a canopy urbana (TEB) calcola la temperatura della parete e della superficie del tetto, così come le condizioni climatiche all'interno del canyon urbano. Entrambi i modelli iterano i risultati fino a che un criterio di convergenza sia soddisfatto.

Questo processo si ripete fino a quando un criterio di convergenza è soddisfatta. Nel presente studio, la convergenza è stata assunta da raggiungere quando la differenza media di temperatura canyon tra le iterazioni sceso sotto 0.05 °C. Questo è tipicamente raggiunto dopo due o tre iterazioni (Bueno et al., 2011).

Lo schema accoppiato è stato utilizzato per analizzare l'impatto sulle emissioni di calore di scarto e le temperature dell'aria esterna con una definizione realistica dei sistemi HVAC. Lo studio mostra che le emissioni di calore di scarto può aumentare la temperatura dell'aria esterna tra 0.8 °K per i quartieri residenziali e 2.8 °K per i quartieri commerciali in estate, sotto ipotesi realistiche in cui i sistemi ad aria condizionata siano utilizzati ampiamente. Lo schema è stato utilizzato anche per valutare l'effetto sul consumo di energia e sulle emissioni di calore di scarto di tre diverse strategie di efficienza energetica per Tolosa. Lo studio dimostra che i dispositivi di ombreggiamento sono una strategia efficace per ridurre il consumo di energia di raffreddamento degli edifici e per mitigare l'effetto di Isola di Calore UHI associato alle emissioni di calore di scarto HVAC. Anche l'utilizzo di sistemi di recupero del calore può realizzare importanti riduzioni dei consumi energetici di riscaldamento, ma non ha un effetto significativo sull'ambiente esterno dovuto alle basse emissioni di calore di scarto associate ai sistemi di riscaldamento a combustione. L'utilizzo di economizzatori nei sistemi HVAC non produce importanti benefici in termini di risparmio energetico o di riduzione del calore di scarto per questo particolare caso di studio. I modelli

energetici dei fabbricati si stanno sviluppando all'interno della comunità scientifica dei climatologi urbani, e vengono integrati in modelli a canopy urbana. Il loro obiettivo è quello di calcolare le emissioni di calore di scarto HVAC nel bilancio energetico esterno, e di includere il consumo di energia degli edifici come un parametro importante per l'analisi e la progettazione delle aree urbane. Lo schema accoppiato, che incorpora già un modello dettagliato energetico dell'edificio, potrebbe quindi essere utilizzato nel processo di valutazione di questi nuovi modelli energetici dei fabbricati.

## 4 Il Caso studio: edificio multipiano per edilizia residenziale

Tenuto conto delle recenti disposizioni fornite dalla direttiva 2012/27 relative al ruolo esemplare degli enti pubblici, secondo cui ciascuno Stato membro dovrà garantire che dal 2014 il 3% della superficie degli immobili posseduti dalle amministrazioni pubbliche centrali sia ristrutturata ogni anno per raggiungere almeno le prestazioni stabilite dai requisiti minimi stabiliti dalla direttiva 2010/31, e che anche tutti gli enti impegnati nell'edilizia sociale, dovranno adottare piani di efficienza energetica autonomi con obiettivi e azioni specifiche analoghe a quelle fissate per le amministrazioni centrali, si è scelto di condurre le simulazioni, ai fini della presente ricerca, su un edificio di studio rappresentativo del panorama costruttivo dell'edilizia sociale italiana del secondo dopoguerra.

Il fabbricato, sito in Pisa, fa parte di un complesso denominato Sant'Ermete, realizzato a partire dal 1948 ad opera del Genio Civile per far fronte all'emergenza abitativa relativa ai reduci di guerra e alle loro famiglie e ospita 12 alloggi, ad oggi fatiscenti. Il fabbricato è situato in via Bronzetti, nel quartiere pisano di Sant'Ermete (in regione climatica D), in un lotto riservato all'edilizia popolare complessivamente delimitato ad est dalla linea ferroviaria in uscita dalla stazione di Pisa Centrale e ad ovest dalla strada statale SS206. Costituito da tre piani fuori terra e un piano seminterrato, l'edificio ospita 6 bilocali di superficie utile 37,53 mq e 6 trilocali di superficie utile 48,65 mq; al piano seminterrato, troviamo degli ambienti a servizio degli alloggi che, data l'altezza di interpiano di 1,30 m, nascono molto probabilmente come vespaio (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**).

La struttura è in muratura portante realizzata con mattoni semipieni a due teste, mentre la copertura è caratterizzata da una struttura di travi prefabbricate in cemento armato (tipo Varese) su cui poggiano i tavelloni e il manto di copertura in tegole marsigliesi. La muratura si presenta complessivamente in buone condizioni, ma la malta risulta essere di qualità scadente; inoltre i mattoni sono stati messi in opera in molti casi con la foratura passante, favorendo così lo scambio termico con l'esterno e aumentando le perdite dovute a trasmissione.

I locali degli alloggi appaiono ben disposti e illuminati, ma sono caratterizzati da superfici (murature, infissi e solai) fortemente disperdenti che influenzano fortemente le scarse prestazioni termiche dell'involucro. Pertanto, al fine di valutare il comportamento energetico dell'edificio a regime e l'effettivo contributo di una copertura a verde rispetto ad una copertura tradizionale, e di una parte verde rispetto ad una parete verticale isolata, si è provveduto a progettare un involucro a media efficienza che costituisce l'invariante prestazionale delle simulazioni.

L'involucro esterno esistente è stato rivestito con un sistema a cappotto (spessore 8 cm) per incrementare la resistenza termica e risolvere il problema dei ponti termici.

I divisori interni sono stati isolati termicamente e acusticamente su entrambe le facce

I solai interpiano sono stati anch'essi isolati termicamente e acusticamente.

Il solaio controterra è del tipo impermeabilizzato su sottofondo in ghiaia.

La parete controterra è rivestita esternamente con membrana bituminosa.

Per le finestre, è stato ipotizzato un telaio in alluminio con vetrocamera 6+13+12 e intercapedine in argon con persiane esterne sempre in alluminio.

Al piano seminterrato, le finestre sono del tipo 6+6+6 con intercapedine d'aria e prive di persiane.

Queste soluzioni costruttive costituiscono l'invariante strutturale degli edifici tipo oggetto di analisi.

Il modello geometrico è stato quindi primariamente caratterizzato in 3 zone termiche distinte:

1. la zona termica ULTIMO PIANO che rappresenta i quattro appartamenti sottotetto (in rosa nella grafica)
2. la zona termica APPARTAMENTI che comprende gli otto appartamenti distribuiti tra piano terra e piano primo (in azzurro nella grafica)
3. la zona termica SCALE/CANTINA che comprende tutti gli ambienti non riscaldati (in blu nella grafica)

L'edificio è stato ipotizzato privo di impianto termico per poterne così simulare il comportamento passivo e valutare con maggiore precisione il contributo assoluto derivante dalla presenza della copertura o della parete verde.

La T° del suolo per il calcolo delle dispersioni del piano interrato, è stata ipotizzata costante e pari a 18°C.

E' stata impostata una ventilazione naturale degli ambienti riscaldati (0,8 Vol/h) esclusivamente nelle ore notturne a persiane chiuse e solamente quando il file climatico rileva un differenza di T° tra ambiente interno ed esterno maggiore di 2°C. E' stata inoltre impostata una chiusura delle persiane delle finestre sul lato ovest nelle ore calde della giornata (14:00-16:30).

Le simulazioni sono state condotte nel periodo estivo, dal 1 giugno al 30 settembre.

#### 4.1 Risultati della simulazione con il Modulo Terrain

Ai fini del presente lavoro di ricerca, le diverse soluzioni tecniche sono state combinate a definire due edifici di riferimento impiegati nelle simulazioni:

- l'edificio Tipo A con copertura inclinata di tipo tradizionale in regole marsigliesi, involucro verticale esterno isolato con cappotto
- l'edificio Tipo B con copertura piana a giardino (tetto verde), involucro verticale esterno isolato con cappotto

La copertura inclinata tradizionale dell'edificio Tipo A è costituita da manto di copertura in tegole marsigliesi su intercapedine ventilata (cm 6) e isolamento termico in EPS, poggiati sul solaio in laterocemento.

La copertura piana a verde 'Green-Roof' dell'edificio Tipo B è costituita da un substrato di suolo (cm 8-20) nel quale cresce la vegetazione, un geotessile in fibre di polipropilene, un pannello di drenaggio in EPS (8 cm) e un manto impermeabile antiradice, poggiati su solaio in laterocemento.

La simulazione condotta con Energy Plus ha permesso il calcolo della temperatura superficiale della copertura in quattro distinti casi presentati in un unico grafico:

- edificio Tipo A, nella City;
- edificio Tipo B Green-Roof, nella City;
- edificio Tipo B Green-Roof, in Suburbs;
- edificio Tipo B Green-Roof, in Country

Le tre distinte dislocazioni sono state già descritte in Tabella 4.

Al fine di condurre una simulazione comparata rappresentativa dei molteplici contesti climatici italiani, sono state scelte a campione tre località nelle tre più diffuse zone climatiche di riferimento:

- Torino, per la zona climatica E - ITA\_Torino.160590\_IWEC.epw
- Pisa per la zona climatica D - ITA\_Pisa.161580\_IWEC.epw
- Palermo per la zona climatica B - ITA\_Palermo.164050\_IWEC.epw

La figura 2 mette a confronto i valori della Radiazione Solare Diretta per una giornata-tipo, in relazione alla località nel periodo da Giugno a Settembre.

La figura 3 mette a confronto i valori della Temperatura dell'aria esterna per una giornata-tipo, in relazione alla località nel periodo da Giugno a Settembre.

La figura 4 mette a confronto i valori della velocità del vento per una giornata-tipo, in relazione alla località nel periodo da Giugno a Settembre.

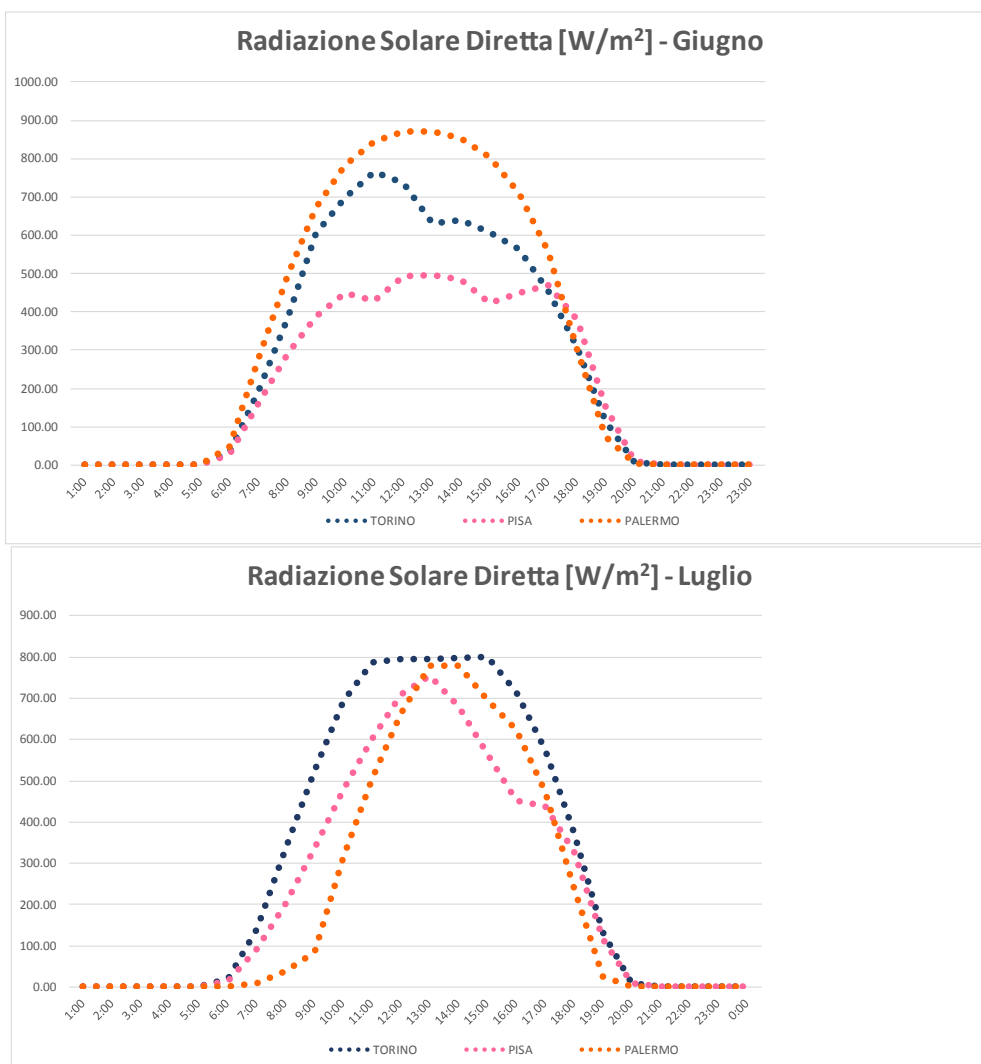
Il grafico temperatura superficiale della copertura presenta due distinte simulazioni: il Green-Roof in tre diverse dislocazioni (City, Suburbs, Country) ed il beneficio che esso può apportare al clima urbano, ed una copertura tradizionale in laterizio, ben isolata termicamente, nella Città (TR City).

Come si può notare dalle figure 5÷16, la diminuzione di temperatura superficiale, nel momento in cui si passa dalla Città alla Campagna, è evidente ed è facilmente comprensibile, poiché Energy Plus calcola le temperature risultanti attraverso un coefficiente di scambio convettivo che è legato alla fluidodinamica del vento. Da notare, nelle Figure 7 e 8 (località: Torino), come giornate in cui la ventosità è scarsa, non risultino apprezzabili le differenze di dislocazione attraverso la analisi condotte con il Modulo Terrain. Dunque, a parità di condizioni climatiche esterne, le zone che offrono meno ostacoli al flusso del vento ed al re-irraggiamento delle pareti laterali verso l'ambiente, saranno sicuramente più fredde delle analoghe dislocate in zone più 'chiuse'. Inoltre, dai grafici possiamo anche apprezzare il notevole effetto di smorzamento delle temperature superficiali delle coperture tipo 'Green-Roof' rispetto ad una copertura tradizionale in laterizio: l'influenza sul fenomeno isola di calore (UHI) è facilmente desumibile.

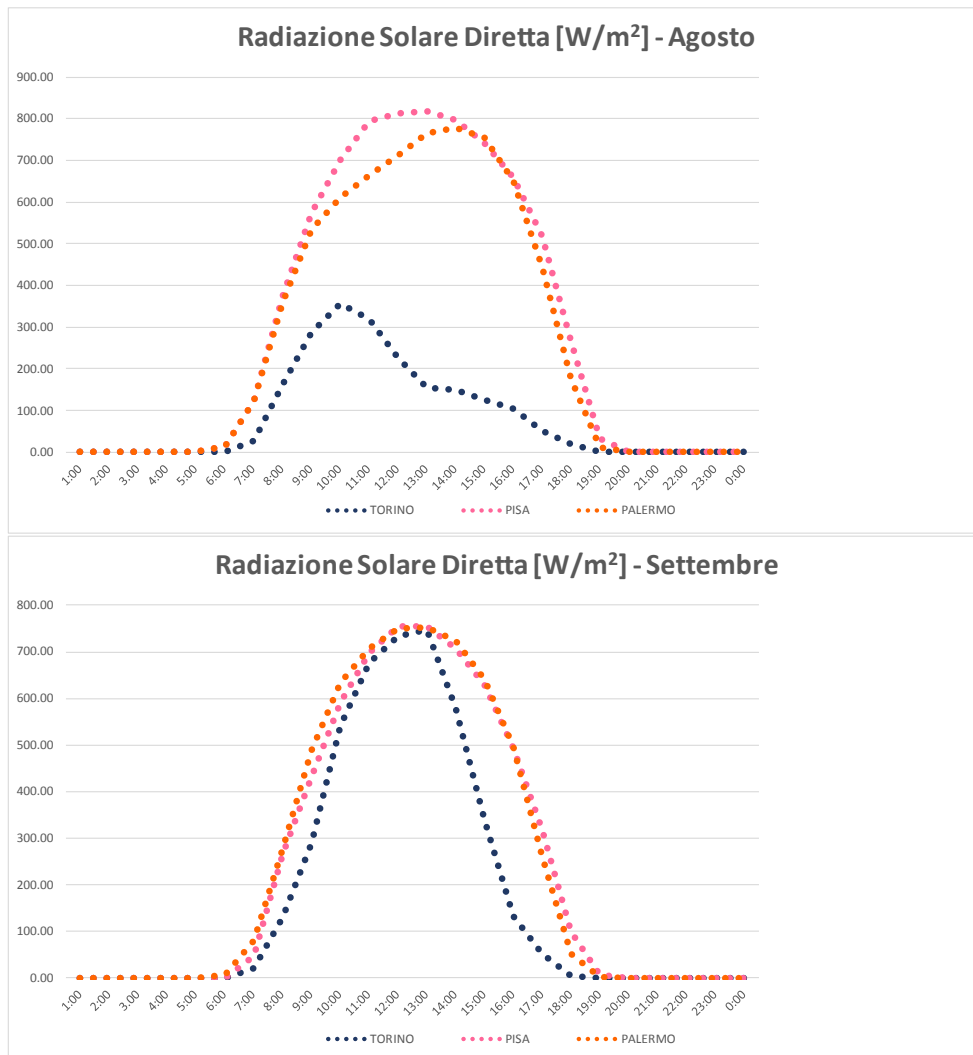
L'andamento della Temperatura superficiale in copertura, come già indicato in bibliografia, sembra costituire un parametro significativo all'interno di questo approccio semplificato.

A seguito della analisi condotta, possiamo affermare che la variabile 'Sito' del modulo Terrain ha una influenza significativa sul calcolo delle temperature superficiali e può essere utilizzato come indicatore dell'effetto isola di calore (UHI) a patto che si scelga in database climatico completo, ovvero corredato con le misure della ventosità e direzione del vento.

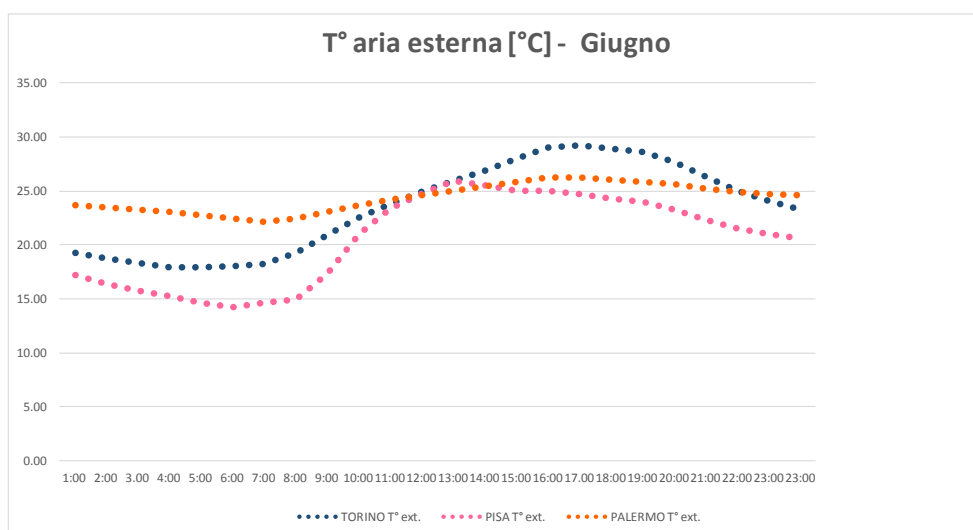
L'analisi e la comparazione di cui sopra è presentata per le tre differenti Località italiane in modo da adattarla a tre diverse situazioni climatiche.

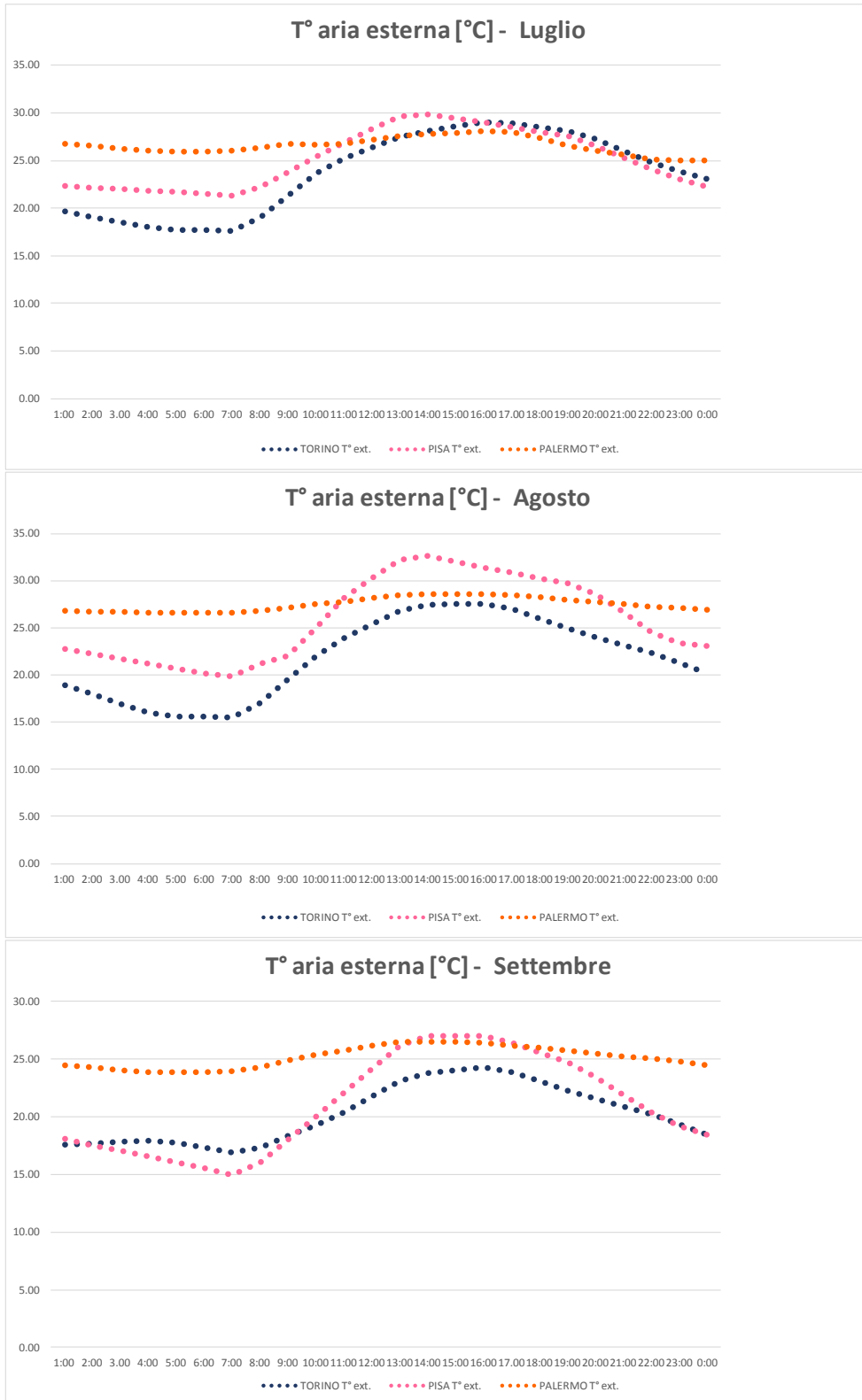




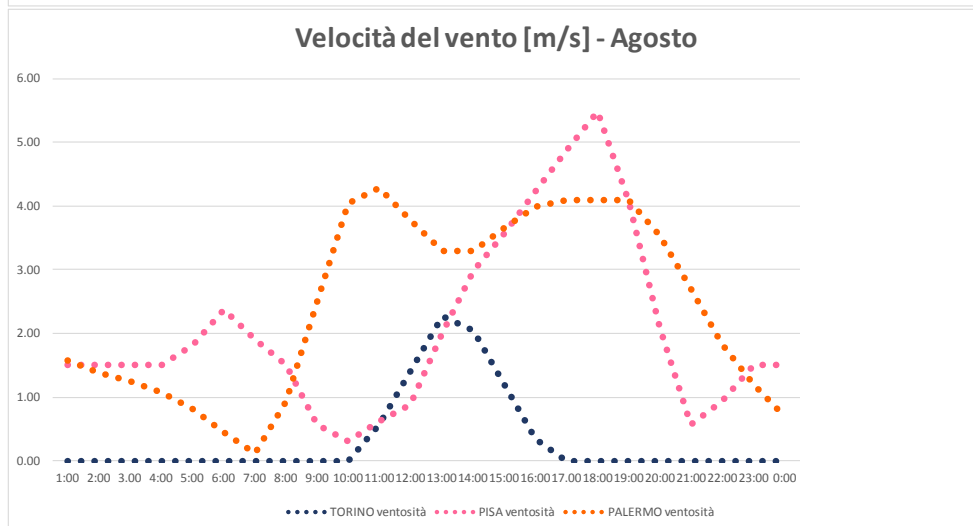
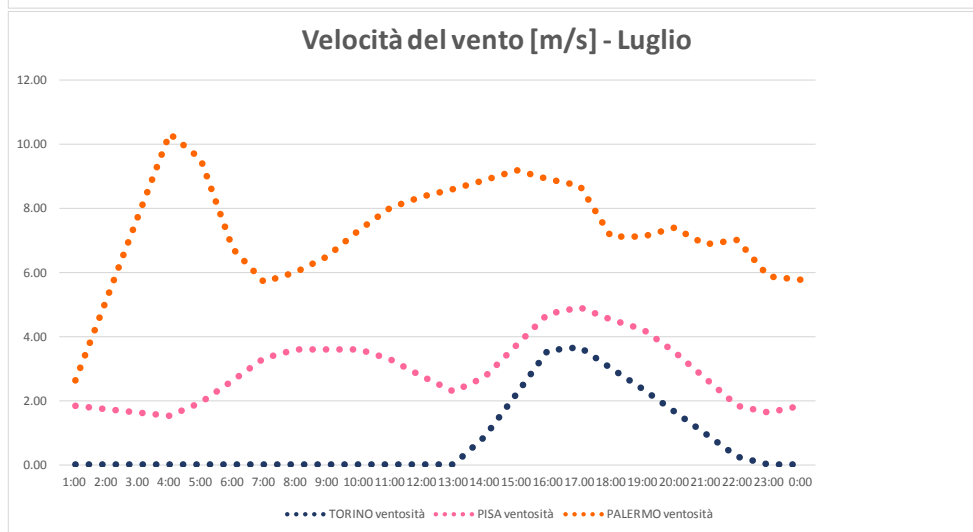
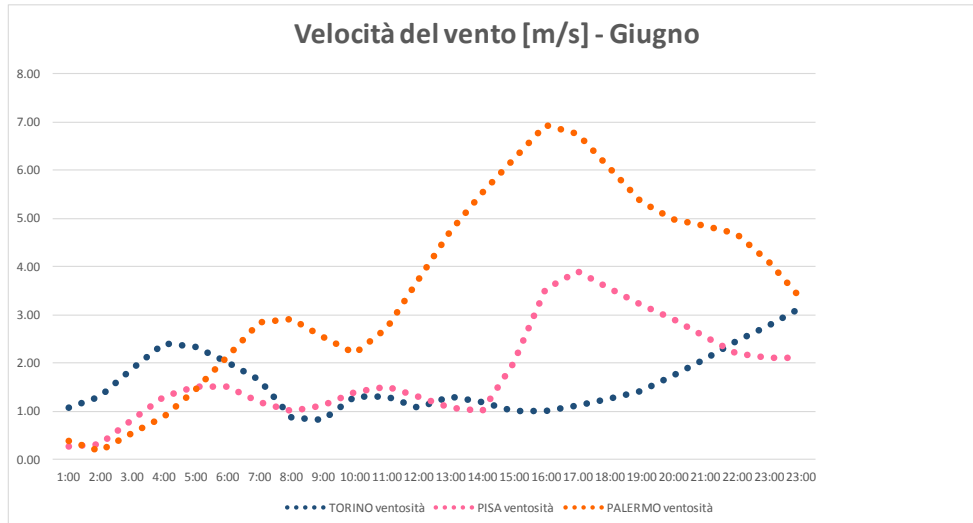


**Fig. 2. Confronto fra i valori della Radiazione Solare Diretta per una giornata-tipo, in relazione alla Località. Periodo:Giugno-Settembre.**





**Fig. 3. Confronto fra i valori della Temperatura dell'aria esterna per una giornata-tipo, in relazione alla Località. Periodo:Giugno-Settembre.**



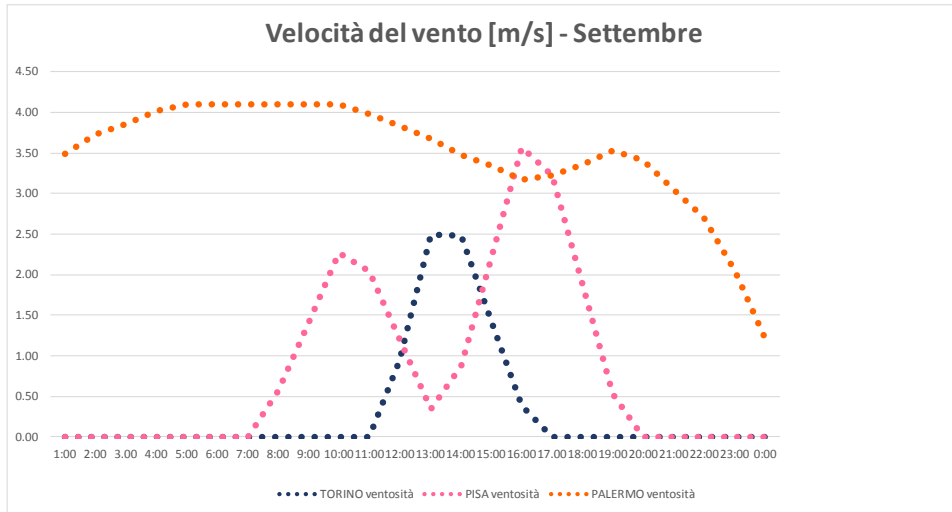


Fig. 4. Confronto fra i valori della ventosità (velocità del vento) per una giornata-tipo, in relazione alla Località. Periodo:Giugno-Settembre.

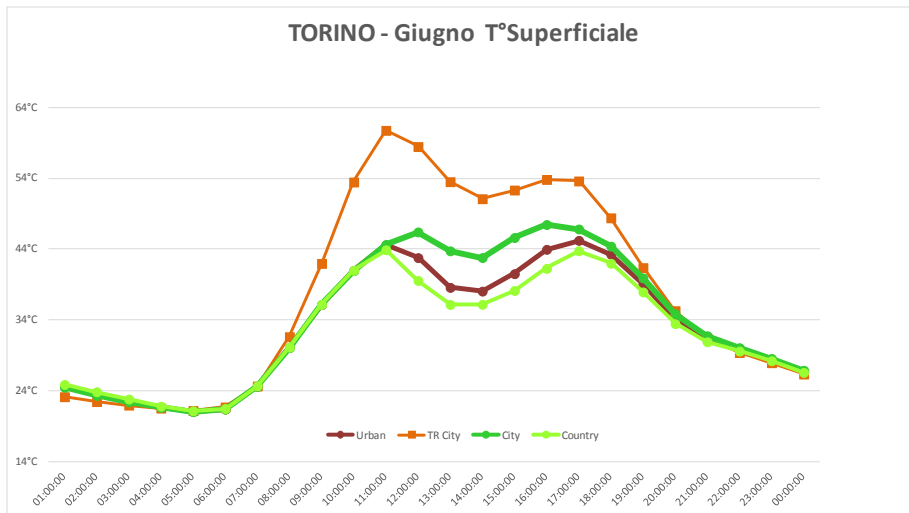


Fig. 5. Confronto fra le temperature superficiali del manto di copertura e dei Green-Roof, in relazione alla loro dislocazione. Località: Torino. Periodo:Giugno.

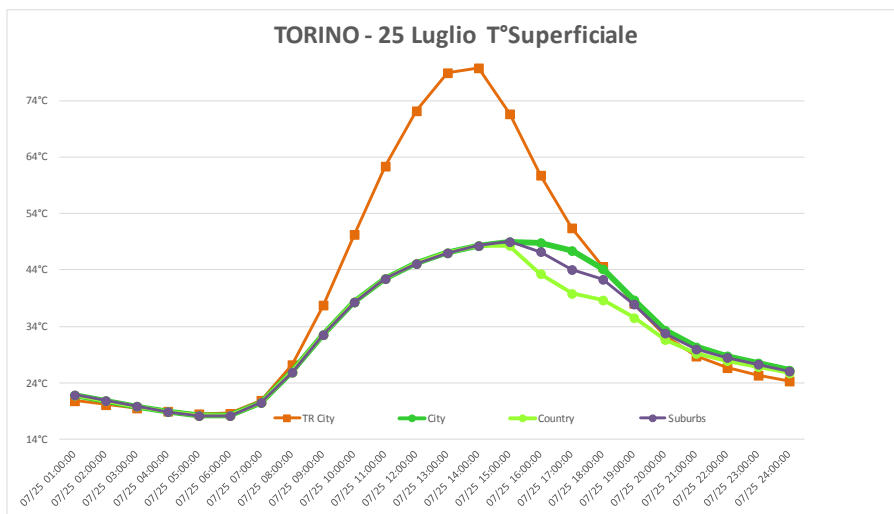
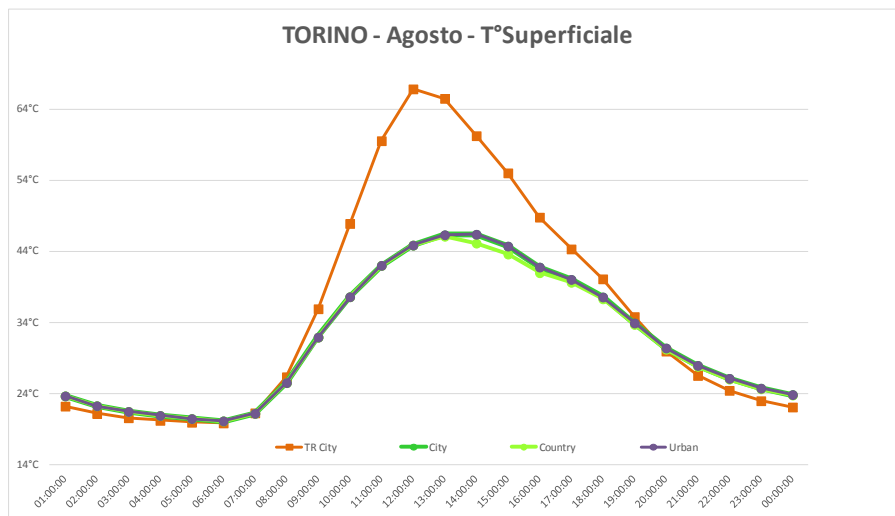
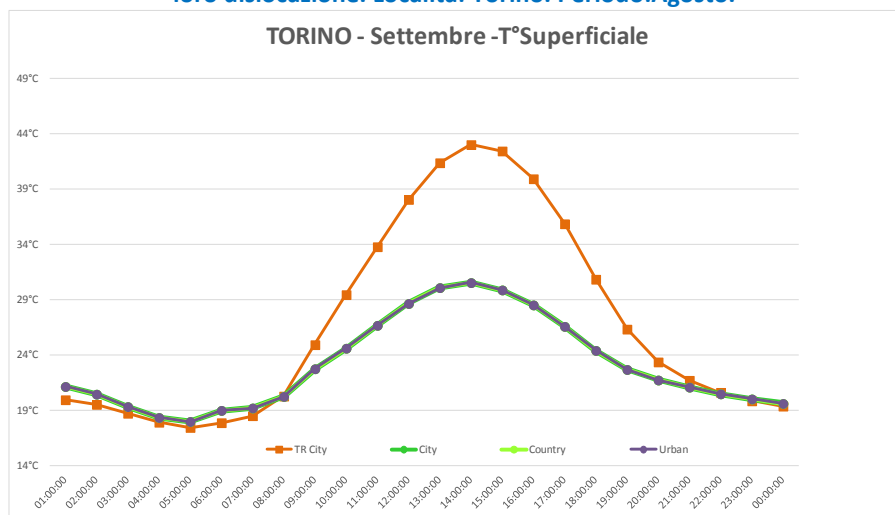


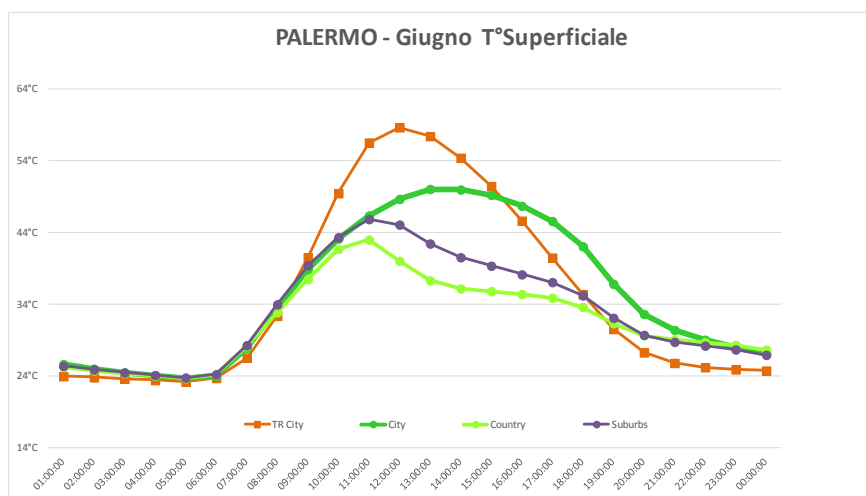
Fig. 6. Confronto fra le temperature superficiali del manto di copertura e dei Green-Roof, in relazione alla loro dislocazione. Località: Torino. Periodo:Luglio.



**Fig. 7. Confronto fra le temperature superficiali del manto di copertura e dei Green-Roof, in relazione alla loro dislocazione. Località: Torino. Periodo:Agosto.**



**Fig. 8. Confronto fra le temperature superficiali del manto di copertura e dei Green-Roof, in relazione alla loro dislocazione. Località: Torino. Periodo:Settembre.**



**Fig. 9. Confronto fra le temperature superficiali del manto di copertura e dei Green-Roof, in relazione alla loro dislocazione. Località: Palermo. Periodo:Giugno.**

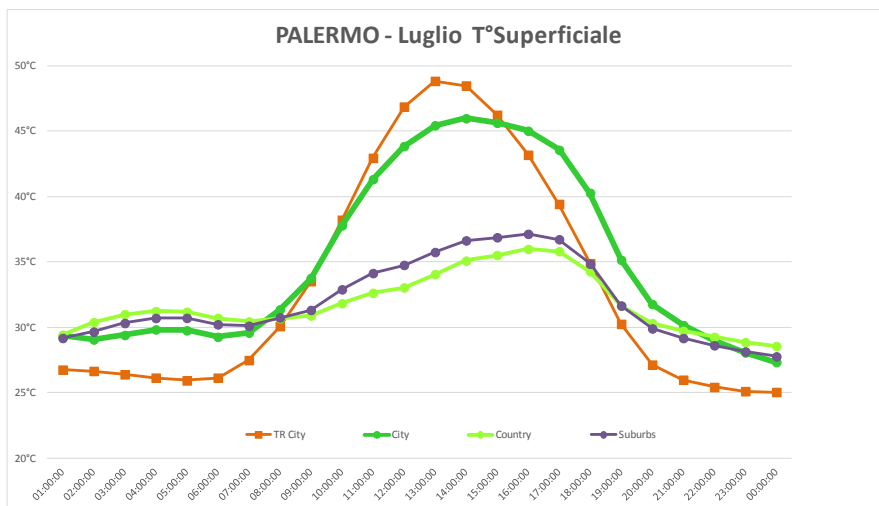


Fig. 10. Confronto fra le temperature superficiali del manto di copertura e dei Green-Roof, in relazione alla loro dislocazione. Località: Palermo. Periodo:Luglio.

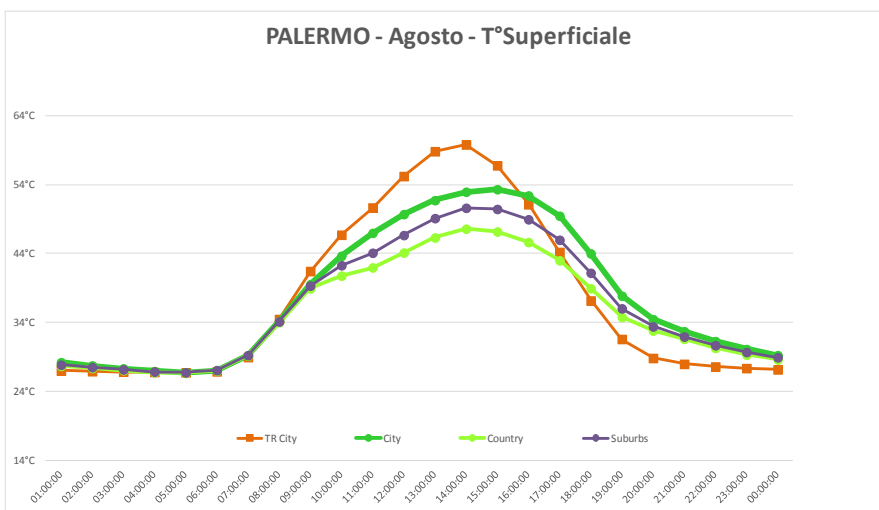


Fig. 11. Confronto fra le temperature superficiali del manto di copertura e dei Green-Roof, in relazione alla loro dislocazione. Località: Palermo. Periodo:Agosto.

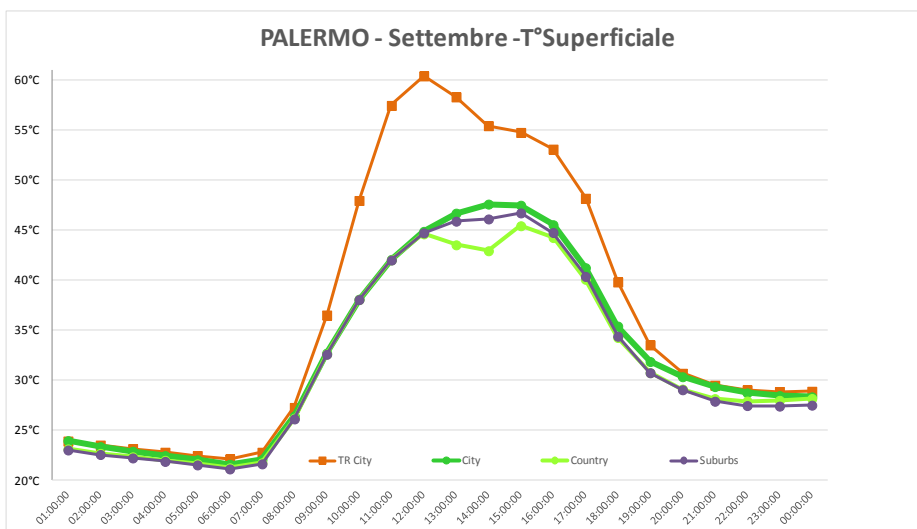
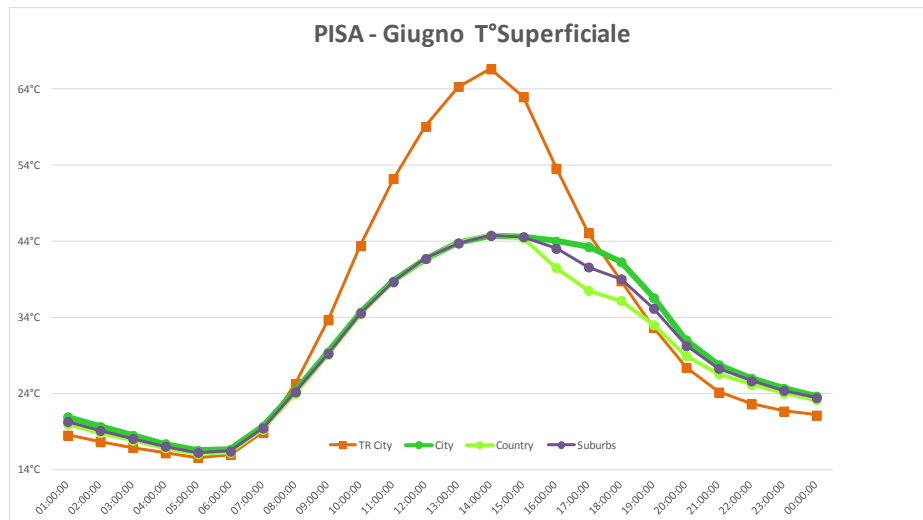
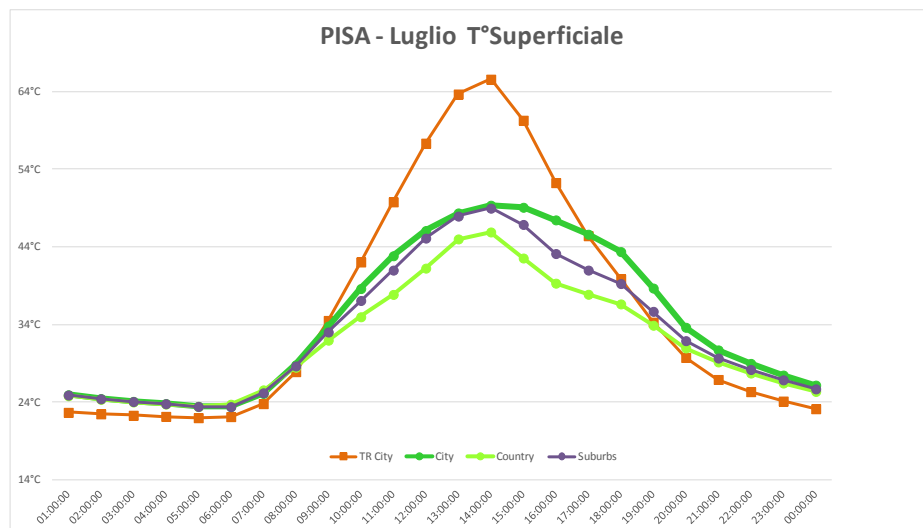


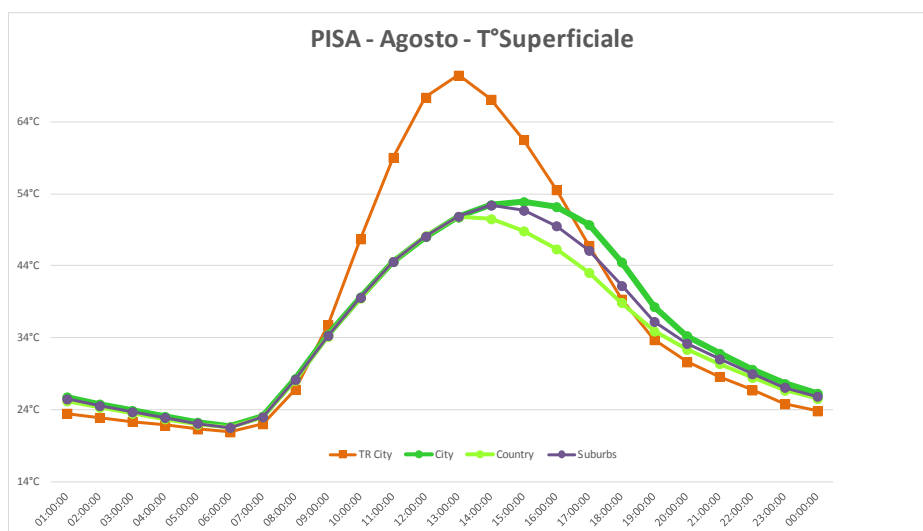
Fig. 12. Confronto fra le temperature superficiali del manto di copertura e dei Green-Roof, in relazione alla loro dislocazione. Località: Palermo. Periodo:Settembre.



**Fig. 13. Confronto fra le temperature superficiali del manto di copertura e dei Green-Roof, in relazione alla loro dislocazione. Località: Pisa. Periodo:Giugno.**



**Fig. 14. Confronto fra le temperature superficiali del manto di copertura e dei Green-Roof, in relazione alla loro dislocazione. Località: Pisa. Periodo:Luglio.**



**Fig. 15. Confronto fra le temperature superficiali del manto di copertura e dei Green-Roof, in relazione alla loro dislocazione. Località: Pisa. Periodo:Agosto.**

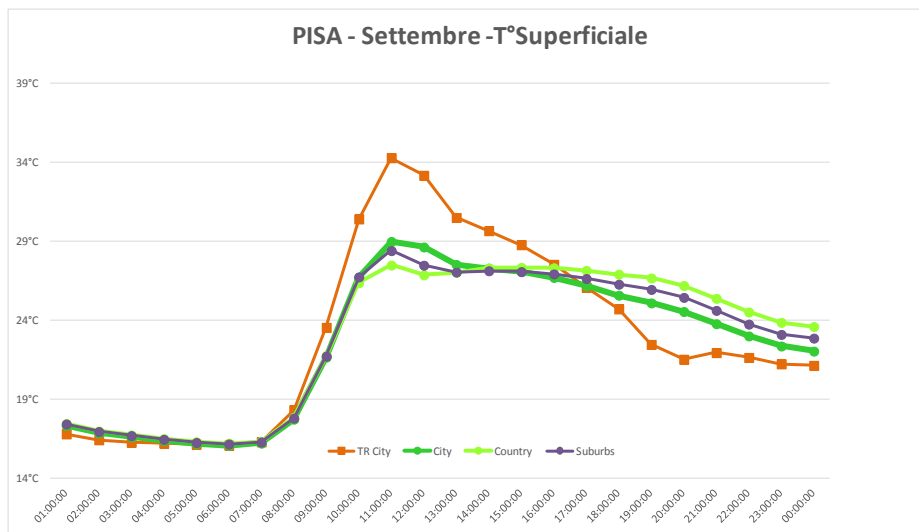


Fig. 16. Confronto fra le temperature superficiali del manto di copertura e dei Green-Roof, in relazione alla loro dislocazione. Località: Pisa. Periodo: Settembre.

## 5 Conclusioni

Come discusso nei paragrafi precedenti, molti studi hanno ampiamente esaminato le possibili misure applicabili per mitigare gli effetti delle isole di calore urbane (UHI), con conseguenti benefici economici e ambientali. Le possibili misure di mitigazione possono essere classificate come:

- relative alla riduzione del rilascio di calore di origine antropica (ad esempio, spegnimento dei condizionatori d'aria);
- relative a una migliore progettazione del tetto (ad esempio tetti verdi, raffreddamento del tetto a aspersione, tetti riflettenti, ecc);
- altri fattori di progettazione (ad esempio umidificazione, aumento dell'albedo, tettoie fotovoltaiche, ecc).

L'isola di calore (UHI), come abbiamo visto, è un fenomeno locale che si ripete giorno dopo giorno. Le scale spaziali che lo caratterizzano variano da qualche chilometro (o decina di chilometri in particolari condizioni) in orizzontale, a qualche centinaio di metri (fino a un paio di chilometri) in verticale; la scala temporale è la ciclicità giornaliera. Perciò, teoricamente, le azioni e gli interventi locali possono avere effetti di mitigazione dell'isola di calore.

E' chiaro che le azioni di mitigazione devono modificare i termini del bilancio energetico superficiale, in particolare possono:

- 1) ridurre il flusso di calore immagazzinato nella struttura urbana  $\Delta QS$ ;
- 2) ridurre il rapporto di Bowen , cioè trasformare parte del flusso di calore sensibile  $QH$  in flusso di calore latente  $QE$ ;
- 3) ridurre il flusso di calore antropogenico  $QF$ ;
- 4) ridurre la radiazione netta  $Q^*$ .

Al fine di ottenere una riduzione del calore immagazzinato, legato anche alla riduzione della radiazione incidente, si potrebbe:

- a) modificare la geometria degli edifici (rapporto tra altezza media e larghezza dei canyon, ecc.);
- b) selezionare opportunamente i materiali utilizzati (privilegiando con maggior resistenza termica, cioè ad esempio migliorando la coibentazione degli edifici e/o quelli a maggior albedo, cioè di colore più chiaro).

Generalmente, l'azione a) può essere molto più efficace della azione b), ma è probabilmente anche di più difficile realizzazione.

Per la riduzione del rapporto di Bowen si può intervenire nei seguenti modi:



- a) diminuire le pavimentazioni impermeabili in favore di quelle permeabili;
- b) aumentare le superfici verdi nell'area urbana.

L'aumento della vegetazione urbana avrebbe anche il vantaggio di creare una schermatura per le superfici sottostanti nei confronti dalla radiazione solare incidente, riducendone il riscaldamento. Tuttavia, durante la notte potrebbe impedire il raffreddamento radiativo delle superfici, contribuendo all'isola di calore notturna.

Per la riduzione del flusso di calore antropogenico alcune azioni consigliate sono elencate per:

- a) ridurre i consumi di energia elettrica;
- b) ridurre il traffico veicolare;
- c) ridurre i consumi per il riscaldamento domestico.

## 6 Riferimenti bibliografici

1. Arnfield A J, Grimmond C S B, 1998. An urban canyon energy budget model and its application to urban storage heat flux modeling. *Energy and buildings*, 27: 61–68.
2. Arnfield A J, 2003. Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*, 23: 1–26.
3. Ashie Y, Thanh V C, Asaeda T, 1999. Building canopy model for the analysis of urban climate. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 81: 237–248.
4. Brotzge J A, Crawford K C, 2003. Examination of the surface energy budget: A comparison of eddy correlation and Bowen ratio measurement systems. *Journal of Hydrometeorology*, 4: 160–178.
5. Bueno B., Norford L., Pigeon G., and Britter R.: Combining a detailed building energy model with a physically-based urban canopy model, *Bound.-Lay. Meteorol.*, 140, 471–489, 2011.
6. Ca V T, Asaeda T, Abu E M, 1998. Reductions in air-conditioning energy caused by a nearby park. *Energy and Buildings*, 29: 83–92.
7. Changnon S A, Kunkel K E, Reinke B C, 1996. Impacts and responses to the 1995 heat wave: A call to action. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77: 1497–1505.
8. Christen A, Vogt R, 2004. Energy and radiation balance of a central European city. *International Journal of Climatology*, 24: 1395–1421.
9. Crawley DB, Lawrie LK, Winkelmann FC, Buhl WF, Huang YJ, Pedersen CO, Strand RK, Liesen RJ, Fisher DE, Witte MJ, Glazer J (2001) EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. *Energy Build* 33:319–331
10. DOE (2010a) EnergyPlus Engineering Reference. EnergyPlus 1075 pp
11. DOE (2010b) EnergyPlus testing with building thermal envelope and fabric load tests from ANSI/ASHRAE Standard 140-2007. GardAnalytics, Arlington Heights 127 pp
12. Dupont S, Otte T, Ching J K S, 2004. Simulation of Meteorological fields within and above urban and rural canopies with a mesoscale model (MM5). *Boundary Layer Meteorology*, 113: 111–158.
13. Giridharan R, Ganesan S, Lau S S Y, 2004. Daytime urban heat island effect in high-rise and high-density residential developments in Hong Kong. *Energy and Buildings*, 36: 525–534.
14. Giridharan R, Lau S S Y, Ganesan S, 2005. Nocturnal heat island effect in urban residential developments of Hong Kong. *Energy and Buildings*, 37: 964–971.
15. Grimmond C S B, 1992. The suburban energy balance: Methodological considerations and results for a mid latitude west coast city under winter and spring conditions. *International Journal of Climatology*, 12: 481–497.
16. Hafner J, Kidder S Q, 1999. Urban heat island modeling in conjunction with satellite-derived surface/soil parameters. *Journal of Applied Meteorology*, 38: 448–465.
17. Hung T, Uchihama D, Ochi S, Yasuoka Y, 2006. Assessment with satellite data of the urban heat island effects in Asian mega cities. *International Journal of Applied Earth Observation and Geo-Information*, 8(1): 34–48.

18. Ichinose T, Shimodozono K, Hanaki K, 1999. Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo. *Atmospheric Environment*, 33: 3897–3909.
19. Ihara T, Kikegawa Y, Asahi K, 2008. Changes in year round air temperature and annual energy consumption in office building areas by urban heat-island countermeasures and energy saving measures. *Applied Energy*, 85(1): 12–25.
20. Jauregui E, 1997. Heat island development in Mexico City. *Atmospheric Environment*, 31: 3821–3831.
21. Kato S, Yamaguchi Y, 2005. Analysis of urban heat island effect using ASTER and ETM + Data: Separation of anthropogenic heat discharge and natural heat radiation from sensible heat flux. *Remote Sensing of Environment*, 99: 45– 54.
22. Kikegawa Y, Genchi Y, Yoshikado H, Kondo H, 2003. Development of a numerical simulation system toward comprehensive assessments of urban warming countermeasures including their impacts upon the urban buildings, energy demands. *Applied Energy*, 76: 449–466.
23. Kikegawa Y, Genchi Y, Kondo H, Hanaki K, 2006. Impacts of city-block-scale counter measures against urban heat island phenomena upon a building’s energy consumption for airconditioning. *Applied Energy*, 83(6): 649–668.
24. Kim Y, Baik J, 2002. Maximum urban heat island intensity in Seoul. *Journal of Applied Meteorology*, 41: 651–659.
25. Kim Y, Baik J, 2004. Daily maximum urban heat island intensity in large cities of Korea. *Theoretical and Applied Climatology*, 79: 151–164.
26. Kim Y, Baik J, 2005. Spatial and temporal structure of the urban heat island in Seoul. *Journal of Applied Meteorology*, 44: 591–605.
27. Klysik K, Fortuniak K, 1999. Temporal and spatial characteristics of the urban heat island of Lodz, Poland. *Atmospheric Environment*, 33: 3885–3895.
28. Kondoh A, Nishiyama J, 1999. Changes in hydrological cycle due to urbanization in the suburb of Tokyo Metropolitan Area, Japan. *Advances in Space Research*, 26: 1173–1176.
29. Konopacki S, Akbari H, 2002. Energy savings for heat island reduction strategies in Chicago and Houston (including updates for Baton Rouge, Sacramento, and Salt Lake City). Draft Final Report, LBNL-49638, University of California, Berkeley.
30. Lemonsu A, Masson V, 2002. Simulation of a summer urban breeze over Paris. *Boundary Layer Meteorology*, 104: 463– 490.
31. Lemonsu A, Grimmond CSB, Masson V (2004) Modelling the surface energy balance of the core of an old Mediterranean city: Marseille. *J Appl Meteorol* 43:312–327
32. Magee N, Curtis J, Wendler G, 1999. The urban heat island effect at fairbanks, Alaska. *Theoretical and Applied Climatology*, 64: 39–47.
33. Martilli A, Clappier A, Rotach MW (2002) An urban surface exchange parameterization for mesoscale models. *Boundary-Layer Meteorol* 104:261–304
34. Masson V, 2000. A physically based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary Layer Meteorology*, 94: 357–397.
35. Masson V, Grimmond C S B, Oke T R, 2002. Evaluation of the town energy balance (TEB) scheme with direct measurements from dry districts in two cities. *Journal of Applied Meteorology*, 41: 1011–1026.
36. Mochida A, Murakami S, Ojima T, Kim S, Ooka R, Sugiyama H, 1997. CFD analysis of mesoscale climate in the greater Tokyo area. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 67/68: 459–477.
37. Montavez J P, Rodriguez A, Jimenez J I, 2000. A study of the urban heat island of Granada. *International Journal of Climatology*, 20: 899–911.
38. Morris C J G, Simmonds I, Plummer N, 2001. Quantification of influences of wind and cloud on the nocturnal urban heat island of a large city. *Journal of Applied Meteorology*, 40: 169–182.
39. Nichol J, Wong M S, 2005. Modeling urban environment quality in a tropical city. *Landscape and Urban Planning*, 73: 49– 58.

40. Offerle B, Grimmond C S B, Fortuniak K, 2005. Heat storage and anthropogenic heat flux in relation to the energy balance of a central European city centre. *International Journal of Climatology*, 25: 1405–1419.
41. Offerle B, Grimmond C S B, Fortuniak K, Klyzik K, Oke T R, 2006. Temporal variations in heat fluxes over a central European City Centre. *Theoretical and Applied Climatology*, 84: 103–115.
42. Oke T R, 1982. The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108: 1–24.
43. Oke T R, 1988. The urban energy balance. *Progress in Physical geography*, 12: 471–508.
44. Palyvos JA (2008) A survey of wind convection coefficient correlations for building envelope energy system' modeling. *Appl Therm Eng* 28:801–808
45. Pigeon G, Moscicki AM, Voogt JA, Masson V (2008) Simulation of fall and winter surface energy balance over a dense urban area using the TEB scheme. *Meteorol Atmos Phys* 102:159–171
46. Pongracz R, Bartholy J, Dezso Z, 2006. Remotely sensed thermal information applied to urban climate analysis. *Advances in Space Research*, 37(12): 2191–2196.
47. Rizwan, AM, Dennis, YCL, Liu, C. 2008: A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of Environmental Sciences* 20, 120–128
48. Rosenfeld A H, Akbari H, Romm J J, 1998. Cool communities: Strategies for heat island mitigation and smog reduction. *Energy and Buildings*, 28: 51–62.
49. Sailor D J, Lu L, 2004. A top-down methodology for developing diurnal and seasonal anthropogenic heating profiles for urban areas. *Atmospheric Environment*, 38: 2737–2748.
50. Sailor DJ (2010) A review of methods for estimating anthropogenic heat and moisture emissions in the urban environment. *Int J Climatol*. doi:10.1002/joc.2106
51. Saitoh T S, Shimada T, Hoshi H, 1995. Modeling and simulation of the Tokyo urban heat island. *Atmospheric Environment*, 30: 3431–3442.
52. Salamanca F, Martilli A (2010) A new building energy model coupled with an urban canopy parameterization for urban climate simulations—Part II. Validation with one dimension off-line simulations. *Theor Appl Climatol*. doi:10.1007/s00704-009-0143-8
53. Salamanca F, Krpo A, Martilli A, Clappier A (2010) A new building energy model coupled with an urban canopy parameterization for urban climate simulations—Part I. Formulation, verification and a sensitive analysis of the model. *Theor Appl Climatol*. doi:10.1007/s00704-009-0142-9
54. Sang J, Liu H, Liu H, 2000. Observational and numerical studies of wintertime urban boundary layer. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 87: 243–258.
55. Spronken-Smith R A, Oke T R, Lowry WP, 2000. Advection and the surface energy balance across an irrigated urban park. *International Journal of Climatology*, 20: 1033–1047.
56. Stanhill G, Kalma J D, 1995. Solar dimming and urban heating at Hong Kong. *International Journal of Climatology*, 15: 933–941.
57. Steinecke K, 1999. Urban climatological studies in the Reykjavik subarctic environment, Iceland. *Atmospheric Environment*, 33: 4157–4162.
58. Takahashi K, Yoshida H, Tanaka Y, Aotake N, Wang F, 2004. Measurement of thermal environment in Kyoto City and its prediction by CFD simulation. *Energy and Buildings*, 36 771–779.
59. Tong H, Walton A, Sang J, Chan J C L, 2005. Numerical simulation of the urban boundary layer over the complex terrain of Hong Kong. *Atmospheric Environment*, 39: 3549– 3563.
60. Voogt J A, Grimmond C S B, 2000. Modeling surface sensible heat flux using surface radiative temperatures in a simple urban area. *Journal of Applied Meteorology*, 39: 1679– 1698.
61. Wong N H, Yu C, 2005. Study of green areas and urban heat island in a tropical city. *Habitat International*, 29: 547–558.
62. Yamamota Y, 2006. Measures to mitigate urban heat islands. Retrieved 10 Sept 2007. [www.nistep.go.jp/achiev/ftx/eng/stfc/stt018e/qr18pdf/STTqr1806.pdf](http://www.nistep.go.jp/achiev/ftx/eng/stfc/stt018e/qr18pdf/STTqr1806.pdf).
63. Yamda T, 2000. Building and terrain effects in a mesoscale model. In: 11th Conference on Air Pollution Meteorology, Long Beach California, New Mexico. 9–14 January 2000, 215–220.
64. Yu C, Hien W N, 2006. Thermal benefits of City Parks. *Energy and Buildings*, 38(2): 105–120.

65. World Urbanization Prospectus, 2004. Department of Economic and Social Affairs United Nations. Retrieved 20 November 2006. <http://www.un.org/esa/population/publications/wup2003/2003WUPHighlights.pdf>.

## 7 Abbreviazioni ed acronimi

HVAC: Heating Ventilation and Air Conditioning , ovvero Riscaldamento, ventilazione e condizionamento dell'aria.

TEB: Temperature Energy Balance

UHI : Urban Heat Isle , ovvero Isola di Calore Urbano.

## Curriculum scientifico del gruppo di lavoro impegnato nell'attività

*Prof. Ing. Fabio Fantozzi*

Fabio Fantozzi, nato a Pontedera (Pi) nel 1954, laureato in Ingegneria Meccanica con tesi sperimentale dal titolo "Progetto di un corpo nero sul principio del tubo di calore per applicazioni termometriche" presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Pisa, Dottore di Ricerca in Fisica Tecnica (1° ciclo- Curriculum: Termofluidodinamica, è attualmente Professore Associato presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni (DESTEC).

Oltre ad un'intensa attività didattica, ha partecipato, in qualità di relatore, a circa 100 tesi di laurea nell'ambito dei Corsi di Laurea in Ing. Meccanica, Chimica, Civile ed Edile. Questa attività, in qualche caso, lo ha portato non solo a fare da correlatore di studenti di altre Facoltà (Architettura di Firenze e C.L. in Conservazione e Beni Culturali dell'Università di Parma) ma anche ad intraprendere importanti collaborazioni di ricerca con Enti e Università straniere

È attualmente Presidente del Consiglio aggregato dei Corsi di laurea magistrale in Ingegneria idraulica, dei trasporti e del territorio, in Ingegneria edile, in Ingegneria delle Costruzioni civili e in Ingegneria edile e delle Costruzioni civili (laurea interclasse di recente istituzione).

L'attività scientifica si è svolta inizialmente su diverse applicazioni di tubi di calore, su cui aveva lavorato anche durante la tesi (Titolo: "Progetto di un corpo nero sul principio del tubo di calore per applicazioni termometriche").

In particolare, i tubi di calore erano costituiti da termosifoni bifase con applicazioni previste nei campi:

- a) della geotermia
- b) del raffreddamento dell'elettronica, soprattutto di potenza.

Tale attività è stata a lungo svolta in collaborazione con il Moscow Power Engineering Institute di Mosca.

Successivamente, ha cominciato ad interessarsi all'influenza che i parametri termoigrometrici e l'inquinamento esterno hanno sugli ambienti in cui si voglia garantire una corretta conservazione dei manufatti di interesse storico ed artistico, facendo anche parte di gruppi di lavoro, nell'ambito del CTI (Comitato Termotecnico Italiano) per la stesura di progetti di norme sull'argomento

Attualmente, con riferimento alle Direttive Europee sul rendimento energetico in edilizia, svolge la sua attività, principalmente su tematiche di diagnosi energetica, risparmio energetico e riqualificazione di edifici esistenti, tema sul quale è stato chiamato a fare da relatore in diverse occasioni.

Ha lavorato sul tema della "Certificazione Energetica degli edifici", anche nell'ambito del Comitato Termotecnico Italiano (CTI) in cui ha fatto parte di due specifici Gruppi di Lavoro del SottoComitato 1 riguardanti: a) Norme tecniche a supporto della legislazione energetica degli edifici, b) Caratteristiche termiche dei materiali.

L'attività si è poi definitivamente spostata su temi più tipici della Fisica Tecnica Ambientale, in particolare sullo studio di pareti multistrato e ventilate in edilizia, tema con cui ha fatto parte anche di diversi PRIN di ricerca a livello nazionale.

Ha lavorato su tematiche acustiche, con particolare riferimento a barriere acustiche autostradali.

Ha condotto, in qualità di Responsabile, diversi contratti di ricerca con aziende, su tematiche energetiche e ha partecipato come relatore a diversi Convegni e Corsi, sempre in materia energetica, sia in Italia che all'estero.

L'attività di ricerca svolta è documentata dalla produzione di un centinaio di lavori scientifici pubblicati su riviste internazionali e italiane e su atti di convegni.

*Ing. Carlo Bibbiani*

Carlo Bibbiani, nato a Pisa nel 1962, consegue la Laurea in Ingegneria Civile, Sezione Idraulica, presso la Università degli Studi di Pisa. Successivamente consegue il titolo di Dottore di Ricerca in "Genio rurale"

(IX° Ciclo, 1996) presso l'Università di Pisa. Dal 2001 è Ricercatore universitario presso il Dipartimento di Scienze Veterinarie (DSV) dell'Università di Pisa.

Ha svolto ricerche nei seguenti settori : Energia rinnovabile applicata ai sistemi serra; Compilazione di software volto alla simulazione climatica nelle serre; Studio delle proprietà fisiche ed idrauliche dei substrati per le colture fuori suolo; Simulazione della relazione suolo-acqua nelle colture fuori suolo.

Ha partecipato come relatore a diversi Convegni ,in materia energia rinnovabili applicate alla agricoltura, sia in Italia che all'estero.

L'attività di ricerca svolta è documentata dalla produzione di una cinquantina di lavori scientifici pubblicati su riviste internazionali e italiane e su atti di convegni.

*Arch. Caterina Gargari*

Gargari, Laureata in Architettura presso la facoltà di Architettura dell'Università degli Studi di Firenze, dottore di Ricerca in Tecnologia dell'Architettura, svolge attività di ricerca presso il Dipartimento TAeD Tecnologie dell'Architettura e Design di Firenze e il Dipartimento DESTEC dell'Università di Pisa sulle tematiche della progettazione sostenibile con particolare riguardo alla qualificazione energetica e alla valutazione di impatto ambientale di materiali ed edifici. Ha iniziato la sua attività di ricerca partecipando a numerosi progetti europei sulla progettazione ambientale, il risparmio e l'efficienza energetica, l'utilizzo di energie rinnovabili, con particolare riferimento alla progettazione in clima mediterraneo. Dal 2004 si occupa nello specifico di Valutazione delle prestazioni ambientali dei materiali da costruzione secondo la metodologia LCA e dal 2006 è membro stabile, nominato da UNI, del tavolo di lavoro CEN TC 350 "Sustainability of Construction Works".