

Alma Mater Studiorum – Università di Bologna

DOTTORATO DI RICERCA IN  
INGEGNERIA GEOMATICA E DEI TRASPORTI

Ciclo XXIV

**Settore Concorsuale di afferenza: 08/A4**

**Settore Scientifico disciplinare: ICAR/06**

TITOLO TESI

Utilizzo delle bande dell'Infrarosso Termico in tecniche di  
remote sensing per applicazioni in ambito urbano

**Presentata da: Ing. Paolo Conte**

**Coordinatore Dottorato**

**Prof. Gabriele Bitelli**

**Relatore**

**Prof. Gabriele Bitelli**

**Esame finale anno 2012**

## **Introduzione**

### **1. Il telerilevamento nell'Infrarosso Termico. Fondamenti teorici**

- 1.1 L'irraggiamento: Planck, Wien , Stephan-Boltzmann, Kirchoff
- 1.2 L'interazione tra radiazione e atmosfera: le bande MWIR e SWIR
- 1.3 La termografia: caratteristiche dei sensori infrarossi, funzionalità delle termocamere, applicazioni
- 1.4 La risposta spettrale del sensore

### **2. Il Telerilevamento Termico da piattaforma satellitare**

- 2.1 Caratteristiche, potenzialità e limiti, sensori disponibili
- 2.2 Calcolo della LST e ruolo dell'emissività
- 2.3 Telerilevamento termico satellitare in area urbana
- 2.4 Il fenomeno dell'Urban Heat Island
- 2.5 Sperimentazione sull'area urbana di Bologna

### **3. Il Telerilevamento Termico da piattaforma aerea**

- 3.1 Caratteristiche e campi d'applicazione
- 3.2 Il modello di correzione interna delle termocamere
- 3.3 L'influenza dell'atmosfera sulle immagini termiche aeree
- 3.4 Il ruolo dell'emissività e dello Sky View Factor
- 3.5 Alcune esperienze di termografia aerea in area urbana

## **4. Il calcolo della temperatura superficiale delle coperture edilizie tramite termografia aerea**

4.1 Il progetto Central Europe Energycity

4.2 I rilievi aerei e terrestri: strumenti e modalità operative

4.3 La sperimentazione sull'area urbana di Treviso

4.3.1 Operazioni preliminari

4.3.2 Geocodifica e correzione geometrica

4.3.3 Calcolo della radianza teorica al sensore

4.3.4 Correzione radiometrica del mosaico e calcolo della temperatura superficiale

4.3.5 Correzione radiometrica del mosaico e calcolo della temperatura superficiale

## **5. Conclusioni**

## **6. Bibliografia**

## **ALLEGATI**

## **Introduzione**

La termografia, ovvero l'acquisizione ed elaborazione di immagini digitali acquisite da sensori operanti nella regione spettrale dell'Infrarosso Termico, permette l'acquisizione a distanza di informazioni sullo stato termico delle superfici osservate.

In una recente lettera al Presidente degli Stati Uniti (Hay et al., 2011) un consorzio di 47 partners industriali ha richiesto che l'amministrazione pubblica adotti strategie per fornire ai cittadini e ai proprietari di abitazioni delle informazioni fruibili sull'utilizzo e lo spreco d'energia negli edifici, in modo da attivarsi per migliorarne l'efficienza energetica su larga scala; il telerilevamento termico da piattaforma aerea è uno strumento che offre una visione sinottica anche di grandi aree, e si offre come possibile candidato alla realizzazione di questo obiettivo.

L'utilizzo delle bande spettrali dell'Infrarosso combinato alle odierne tecniche di telerilevamento mostra potenzialità fino ad alcuni anni fa inimmaginabili in svariati campi d'applicazione e permette analisi anche su aree piuttosto vaste e a costi relativamente contenuti.

Il presente lavoro, frutto dell'esperienza triennale di dottorato in Ingegneria Geomatica e dei Trasporti presso il Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e dei Materiali dell'Alma Mater Studiorum, tratta di aspetti e applicazioni delle tecniche e tecnologie di telerilevamento basate sull'utilizzo delle bande spettrali dell'Infrarosso termico.

Sono stati esaminati i diversi campi d'applicazione per i quali vengono utilizzati sensori termici, e sono state effettuate alcune sperimentazioni di termografia riguardanti in particolare il fenomeno dell'Urban Heat Island e il calcolo della temperatura



superficiale delle coperture edilizie da piattaforma aerea, finalizzato alla valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici.

Il primo capitolo tratta dei fondamenti teorici del telerilevamento termico, con la descrizione delle leggi fondamentali che regolano lo scambio di calore per irraggiamento (Planck, Wien, Stephan Boltzmann, Kirchoff), la descrizione dei sensori termici, delle termocamere e delle loro caratteristiche, l'evoluzione recente della tecnologia, l'elenco dei vari campi d'applicazione per cui il telerilevamento termico è stato utilizzato con successo.

Nei capitoli successivi vengono descritti gli aspetti, le peculiarità e le potenzialità offerte dai sensori operanti nell'infrarosso termico in base alla piattaforma su cui operano: essi possono essere utilizzati infatti per acquisizioni satellitari, aeree o terrestri, e la loro applicabilità (come gli algoritmi utilizzati di volta in volta per i diversi tipi di studio) dipende appunto dal tipo di sensore, dalle sue specifiche tecniche e dallo stato d'evoluzione di tecniche per lo specifico tipo di analisi.

Il secondo capitolo tratta del *thermal remote sensing* da piattaforma satellitare, ed in particolare delle applicazioni finalizzate alla misura della temperatura al suolo da osservazioni remote e della modellazione degli scambi energetici che avvengono sulla superficie terrestre in base all'osservazione della radianza emessa dagli oggetti al suolo. Vengono inizialmente descritti i principali sensori satellitari operanti nelle bande dell'Infrarosso, gli algoritmi di calcolo della Land Surface Temperature maggiormente diffusi, viene analizzato il ruolo dell'emissività e i diversi metodi per la sua stima da immagine satellitare, elencando limiti e potenzialità di questo tipo di applicazioni. La seconda parte del capitolo tratta più specificatamente del fenomeno dell'isola di calore urbano (*Urban*

*Heat Island*), descrivendone le caratteristiche principali, valutando lo sviluppo delle tecniche mediante l'analisi di diversi studi effettuati a riguardo e descrivendo la sperimentazione effettuata sull'area urbana di Bologna in base ad immagini termiche satellitari. Sono state a tal fine elaborate delle immagini acquisite nell'Infrarosso termico dal sensore satellitare ASTER sull'area urbana di Bologna per valutare la presenza della SUHI (*Surface Urban Heat Island*), ovvero dell'innalzamento delle temperature superficiali rispetto al loro intorno rurale: sono stati applicati diversi algoritmi per la stima dell'emissività dei pixel, e sono stati quindi calcolati i valori di temperatura superficiale mediante l'inversione della legge di Planck. Dall'analisi dei risultati il fenomeno dell'UHI risulta evidente per tutte le date considerate, anche se la sua intensità risulta di difficile quantificazione e dipende dall'algoritmo utilizzato.

Il terzo capitolo tratta della termografia effettuata da piattaforma aerea: vengono descritti i sensori disponibili e le loro caratteristiche, le differenze principali rispetto alla termografia satellitare, gli algoritmi di correzione interna utilizzati dalle termocamere commerciali. Vengono inoltre analizzati l'influenza dell'atmosfera e la modellazione dei suoi effetti sulla radianza rilevata, il ruolo dell'emissività delle superfici con diversi metodi utilizzati per la sua valutazione. Viene infine effettuata l'analisi critica di alcune applicazioni simili disponibili in letteratura, cercando di stabilire metodi e algoritmi ottimali per questo tipo di ricerca.

Il quarto capitolo tratta nel dettaglio la misura della temperatura superficiale delle coperture edilizie da immagini termiche aeree, attività prevista nell'ambito del progetto europeo EnergyCity del quale vengono inizialmente descritte le finalità, le fasi operative, le città coinvolte e i partner che ne fanno parte.

Sono successivamente descritti gli strumenti disponibili, le modalità di rilievo aereo e terrestre e i dati aggiuntivi necessari per l'implementazione del sistema Geoweb finalizzato alla valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici. L'ultima parte del capitolo è dedicata alla sperimentazione delle tecniche sulla città di Treviso, su cui è stata creata una mappa di *Brightness Temperature* a partire da immagini termiche acquisite da piattaforma aerea durante l'inverno del 2010. Le immagini, precedentemente ortorettificate e mosaicate dall'Istituto di Oceanografia e Geofisica Sperimentale di Trieste, sono state elaborate per correggere alcuni errori geometrici residui e per la correzione degli effetti atmosferici, al fine di creare mappe georiferite di temperatura superficiale di corpo nero. L'accuratezza delle correzioni effettuate è stata valutata utilizzando come dati di verità a terra le misurazioni effettuate durante i rilievi termografici terrestri contemporanei alle acquisizioni aeree. Le mappe di temperatura superficiale delle coperture verranno utilizzate (a seguito della correzione per gli effetti dell'emissività delle coperture) in combinazione con un modello energetico sviluppato da altri partner del progetto per la creazione di uno SDSS (*Spatial Decision Support System*) in ambito GIS, finalizzato alla valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici e alla riduzione della produzione di CO<sub>2</sub>.

# **1. Il telerilevamento nell'Infrarosso Termico. Fondamenti teorici**

## **1.1 L'irraggiamento: Planck, Wien , Stephan-Boltzmann, Kirchoff**

Il trasporto di energia tra i corpi avviene per conduzione, convezione e irraggiamento. La conoscenza della temperatura degli oggetti al suolo interessa diversi settori della modellistica ambientale, come l'analisi degli scambi d'acqua e energia tra le superfici e l'atmosfera, i sistemi numerici di previsione meteorologica, la circolazione delle masse d'acqua negli oceani, e gli studi sui cambiamenti climatici (Brivio et al., 2006).

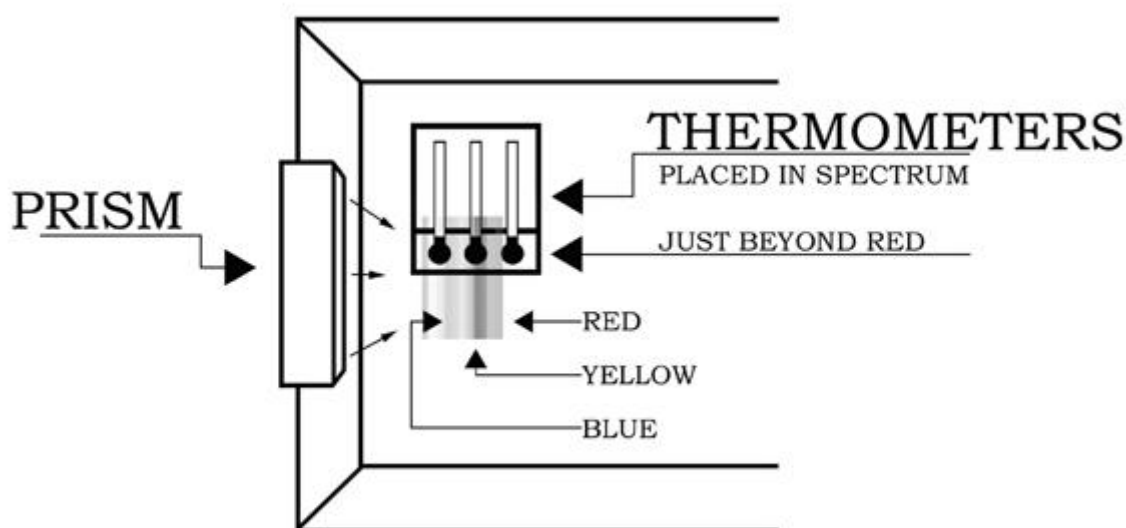
L'analisi della radiazione emessa o riflessa dagli oggetti (e della loro interazione con l'atmosfera circostante) in una regione dello spettro elettromagnetico diversa dal visibile, dove l'intensità di radiazione è strettamente correlata alla temperatura e alle sue variazioni, offre la possibilità di analizzare sia le proprietà termiche e in generale fisico-chimiche dei materiali che molti processi transitori legati allo scambio di calore tra superfici e alla temperatura stessa.

E' importante sottolineare come il telerilevamento termico non si basi sulla misura remota della temperatura degli oggetti, bensì sulla rilevazione e misurazione da parte del sensore della radiazione infrarossa proveniente da essi che, una volta note le caratteristiche chimico-fisiche degli stessi, può essere correlata tramite relazioni matematiche ben definite alla loro temperatura superficiale.

La radiazione infrarossa fu scoperta nel 1800 da Sir. William Herschel: egli, ponendo dei termometri in corrispondenza di ogni colore determinato dalla scomposizione della luce bianca mediante un prisma (*fig.1.1*), constatò che la temperatura

misurata più alta si trovava sulle frequenze del rosso, ma che una temperatura ancora maggiore (che corrispondeva quindi al massimo trasferimento di energia) era riscontrabile appena oltre di esse, in corrispondenza della radiazione su delle frequenze che appartenevano a quella regione dello spettro elettromagnetico che venne poi denominata appunto l' "Infrarosso" (Lanzoni, 2010).

Un corpo a temperatura maggiore dello zero assoluto ( $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) emette radiazioni elettromagnetiche: la quantità di radiazione e la sua distribuzione nello spettro elettromagnetico dipendono principalmente dalla temperatura del corpo e dalla sua emissività, anch'essa variabile con la lunghezza d'onda.



*Fig. 1.1 – L'esperimento di Sir William Herschel*

Per definizione, un corpo reale la cui emissività è pari a uno su un esteso campo di lunghezze d'onda è chiamato corpo nero per quelle lunghezze d'onda.

Per la legge di Planck l'ammontare di energia radiante che viene emessa da un corpo nero ad una determinata lunghezza d'onda è funzione della sua temperatura secondo l'equazione (Williams, 2009):

$$M_{\lambda_{BB}} = \frac{2 * h * c^2}{\lambda^5} * \frac{1}{\exp \frac{h * c}{\lambda * k * T} - 1}$$

dove  $M_{\lambda_{BB}}$  [ $W * m^{-2} * \mu m^{-1}$ ] è l'irradianza spettrale di corpo nero, ovvero la potenza emessa da una superficie emissiva unitaria per lunghezza d'onda,  $h=6,62 * 10^{-34}$  è la costante di Planck [ $J * s$ ],  $c=2,99792 * 10^8$  [ $m * s^{-1}$ ] è la velocità della luce nel vuoto,  $k=1,38 * 10^{-23}$  [ $J * K^{-1}$ ] è la costante di Boltzmann,  $\lambda$  è la lunghezza d'onda [ $\mu m$ ],  $T$  è la temperatura assoluta [ $^{\circ}K$ ].

La legge di Planck consente anche di calcolare la densità di flusso radiante spettrale  $M_{\lambda}$  [ $W * m^{-2} * \mu m^{-1}$ ] per unità di superficie e per unità di lunghezza d'onda generata da un corpo reale (caratterizzato da emissività spettrale  $\epsilon_{\lambda}$ ) che si trova ad una determinata temperatura:

$$M_{\lambda} = \epsilon_{\lambda} * \frac{2 * h * c^2}{\lambda^5} * \frac{1}{\exp \frac{h * c}{\lambda * k * T} - 1}$$

La relazione precedente può essere riscritta in forma semplificata tramite l'uso di 2 costanti:

$$M_{\lambda} = \epsilon_{\lambda} * \frac{c_1}{\lambda^5} * \frac{1}{\exp \frac{c_2}{\lambda * T} - 1}$$

che valgono rispettivamente  $c_1=2 * \pi * h * c^2 = 3,7413 * 10^8$  [ $W * m^{-2} * \mu m^{-4}$ ] e  $c_2=c * h / k = 1,43878 * 10^4$  [ $\mu m * k$ ].

Per calcolare la potenza [ $W * m^{-2}$ ] emessa da un corpo in un certo intervallo spettrale compreso tra le lunghezze d'onda  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  è sufficiente integrare la relazione precedente in questo intervallo (Brivio et al., 2006)

$$M_{\lambda_1-\lambda_2} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon_{\lambda} * \frac{c_1 * \lambda^{-5}}{e^{\frac{c_2}{\lambda * T}} - 1} d\lambda$$

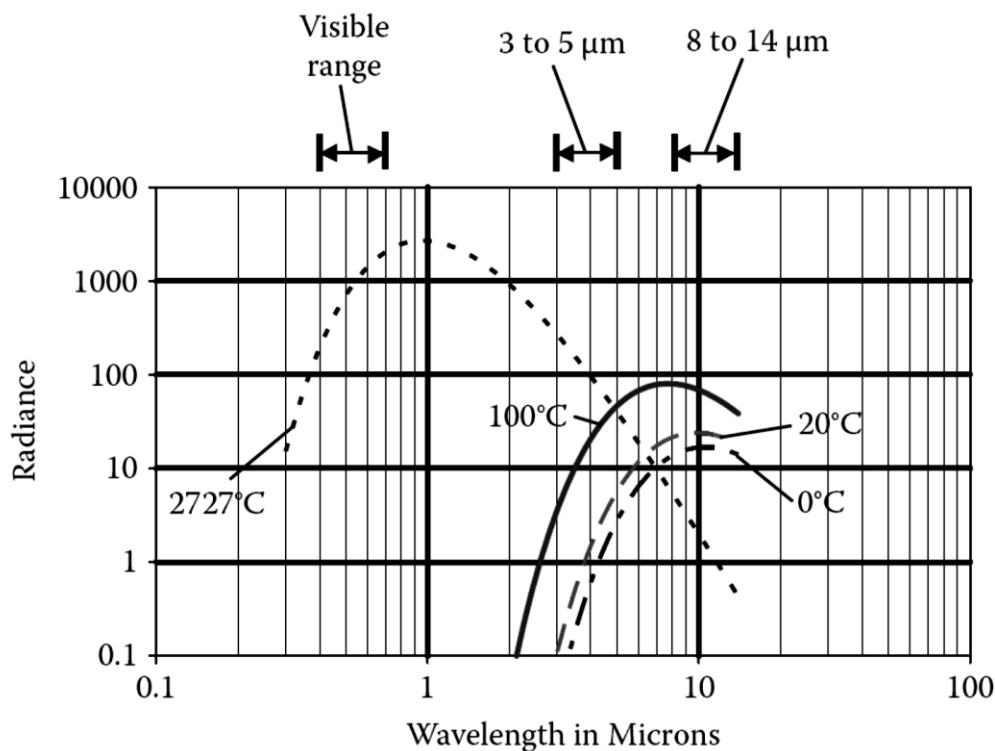
Dalla precedente si evince come, se l'emissività del corpo può

essere considerata costante su tutto lo spettro elettromagnetico, la potenza spettrale emessa dipende solamente dalla lunghezza d'onda e dalla temperatura.

La legge dello spostamento di Wien invece descrive la lunghezza d'onda alla quale corrisponde il massimo dell'energia emessa da un corpo nero, che risulta dipendere solamente dalla sua temperatura (Brivio et al., 2006)

$$\lambda_{max} = \frac{2897}{T}$$

con  $\lambda_{max}$  in  $\mu\text{m}$  e T in gradi Kelvin. Come si può notare in fig. 1.2 dalla temperatura del corpo dipende la distribuzione dell'energia emessa sullo spettro elettromagnetico: un corpo nero a  $273^\circ\text{K}$  ( $^\circ\text{C}$ ), o anche a  $373^\circ\text{K}$  ( $100^\circ\text{C}$ ), non emette radiazioni nelle lunghezze d'onda del visibile, mentre una lampadina a incandescenza (con temperatura di circa  $3000^\circ\text{K}$ ) emette delle radiazioni che sono visibili all'occhio umano.



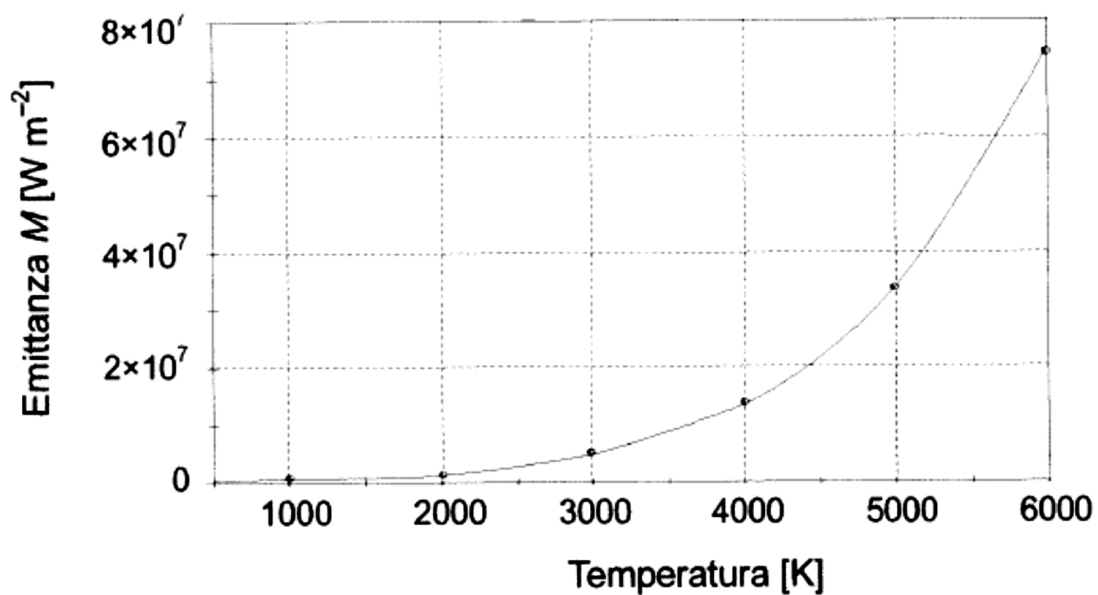
*Fig. 1.2 - Distribuzione spettrale della radianza per corpi neri a diversa temperatura (da Williams, 2009)*

L'energia totale che viene emessa da un corpo nero (con emissività  $\varepsilon$  unitaria) nell'intero spettro elettromagnetico si ottiene dall'integrazione della legge di Planck su tutte le lunghezze d'onda; quest'integrazione è nota come legge di Stefan-Boltzmann:

$$M_{BB} = \int_0^{\infty} M_{\lambda_{BB}} d\lambda = \sigma * T^4$$

dove  $M_{BB}$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) è l'energia totale emessa,  $M_{\lambda_{BB}}$  è l'energia spettrale emessa ( $\text{W} * \text{m}^{-2} * \mu\text{m}^{-1}$ ),  $T$  ( $^{\circ}\text{K}$ ) è la temperatura del corpo e  $\sigma$  ( $\text{W} * \text{m}^{-2} * \text{K}^{-4}$ ) =  $5,670 * 10^{-8}$  è la costante di Stephan Boltzmann.

La variazione dell'emittanza di corpo nero con la temperatura è mostrata graficamente in fig. 1.3.



*Fig. 1.3 - Emittanza di corpo nero al variare della temperatura assoluta  
(da Brivio et al., 2006)*

Le superfici reali non sono abitualmente perfetti emettitori di onde elettromagnetiche (corpi neri): il rapporto tra l'energia radiante di una superficie reale  $E$  rispetto a quella di un corpo nero alla stessa temperatura viene definita come emissività  $\varepsilon$  (Allison, 2007):



$$\varepsilon = \frac{M}{M_{BB}} = \frac{\int_0^{\infty} M_{\lambda} d\lambda}{\sigma * T^4}$$

L'emittanza complessiva  $M_{cr}$  di una superficie reale su tutto lo spettro elettromagnetico viene ottenuta integrando la densità di flusso radiante su tutte le lunghezze d'onda da 0 a  $\infty$ , ovvero:

$$M_{cr} = \int_0^{\infty} \varepsilon_{\lambda} * M_{\lambda} d\lambda = \sigma * T^4 * \int_0^{\infty} \varepsilon_{\lambda} d\lambda$$

Nel caso di corpo grigio, ovvero con emissività  $\varepsilon$  costante per tutte le lunghezze d'onda, il valore dell'irradianza complessiva è calcolabile tramite la legge di Stephan-Boltzmann per i corpi grigi (Brivio et al., 2006):

$$M_{cg} = \int_0^{\infty} \varepsilon_{\lambda} * M_{\lambda} d\lambda = \varepsilon * \sigma * T^4$$

La legge di Kirchoff regola invece l'interazione tra una superficie e la radiazione incidente su di essa (*fig. 1.4*): quest'ultima viene in parte riflessa ( $E_{\rho}$ ), in parte trasmessa ( $E_{\tau}$ ) e in parte assorbita ( $E_{\alpha}$ ); solo la frazione di radiazione emessa è funzione della temperatura della superficie. La legge di Kirchoff stabilisce che, per il principio di conservazione dell'energia:

$$E_{\alpha} + E_{\rho} + E_{\tau} = E_t$$

Esprimendo con i fattori adimensionali  $\tau$ ,  $\rho$ ,  $\varepsilon$  (trasmissività, riflettività ed emissività) i rapporti tra la radiazione incidente e quella rispettivamente trasmessa, riflessa ed emessa, si può scrivere (Lanzoni, 2010):

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

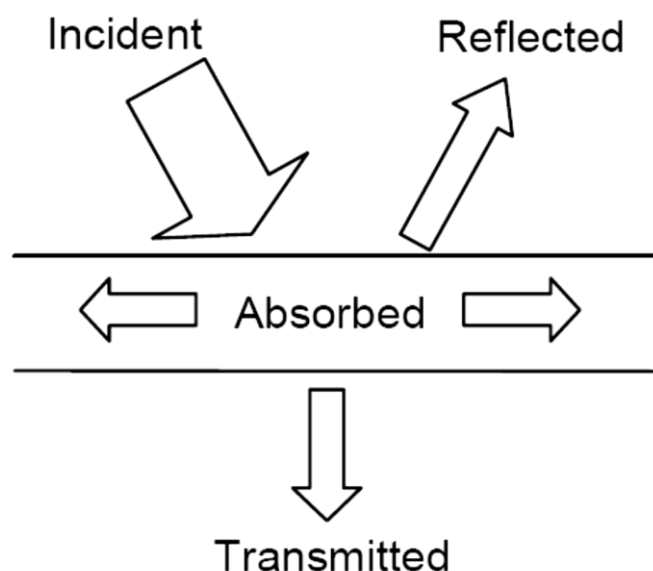
Generalmente i materiali naturali che compongono la superficie terrestre presentano una trasmissività pari a zero nelle lunghezze d'onda dell'Infrarosso, e in questo caso la relazione può essere riscritta come

$$\alpha + \rho = 1$$

Infine, per Kirchoff la quantità di energia emessa da una

superficie deve eguagliare l'energia assorbita dalla superficie (in termini adimensionali  $\varepsilon=\alpha$ ), e si può quindi scrivere

$$\rho = (1 - \varepsilon)$$



*Fig.1.4 – Interazione tra la radiazione incidente e la superficie (da Allison, 2007)*

Naturalmente la relazione appena descritta deve tenere conto della distribuzione della radiazione al variare della frequenza, e l'uguaglianza vale solo se si considera l'integrale dell'energia su tutto lo spettro elettromagnetico. I coefficienti di riflessione, assorbimento e trasmissione variano in funzione della natura chimico-fisica e del grado di rugosità delle superfici, e sono naturalmente variabili con le lunghezze d'onda, per cui alcuni elementi come la neve o le nuvole presentano alta riflettività nel visibile e sono invece perfettamente opache nell'infrarosso (Brivio et al., 2006).

Occorre quindi evidenziare che per le superfici reali è sempre necessario tenere conto della dipendenza di tutte le grandezze radiative dalla lunghezza d'onda, per cui la relazione generale per i corpi reali opachi è la seguente (Brivio et al., 2006)

$$\frac{M_{cr\lambda}}{M_{\lambda BB}} = \varepsilon_{\lambda} = 1 - \rho_{\lambda} = \alpha_{\lambda}$$

Per quanto riguarda la propagazione dell'energia elettromagnetica nello spazio, nel caso di un modello sferico l'emittanza è funzione della radianza direzionale secondo la relazione

$$M = \int_{\omega} L \cdot \cos \theta \, d\omega$$

dove  $\omega$  è l'angolo solido che sottende l'area elementare  $dA$  interessata dal flusso proveniente dal punto  $Q$  (fig. 1.5).

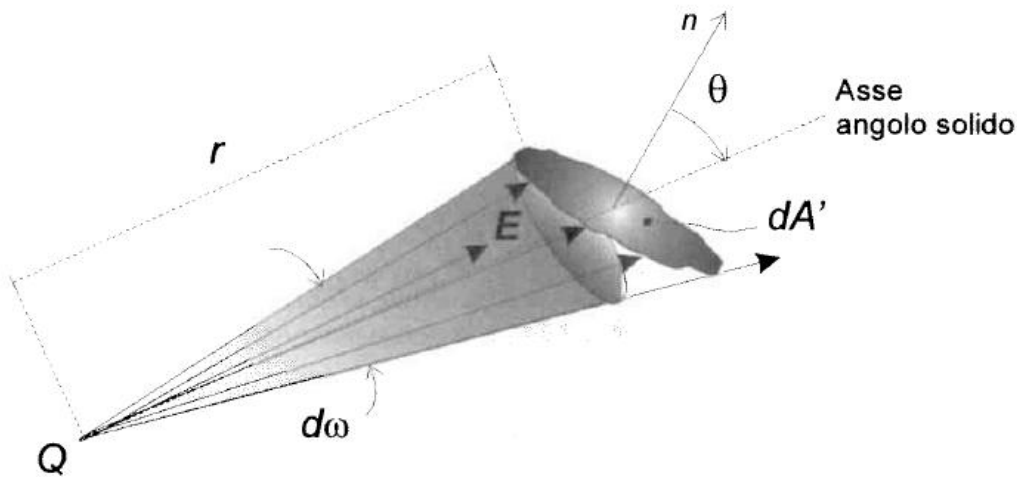


Fig. 1.5 – Irradianza proveniente da una sorgente puntiforme  $Q$  che incide su un'area elementare  $dA'$  (da Brivio et al., 2006)

Tutte le grandezze fisiche espresse finora possono quindi essere definite in termini di radianza anziché di potenza emissiva; la radianza è la potenza emissiva direzionale per unità di angolo solido (steradiante).

Nel caso di mezzo isotropo e superficie Lambertiana l'integrazione precedente su tutta una semisfera ( $2\pi$  steradiani) permette di correlare la radianza direzionale [ $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ ] all'emittanza emisferica [ $W \cdot m^{-2}$ ] calcolata tramite la legge di Planck (Brivio et al., 2006)

$$L = \frac{M}{\pi}$$

valida naturalmente anche se si considera al posto dell'emittanza M l'irradianza E.

Sotto l'ipotesi di mezzo isotropo e superficie lambertiana, la legge di Planck sancisce che la radianza direzionale emessa ad una determinata lunghezza d'onda da un corpo reale è funzione della sua temperatura e della sua emissività a quella stessa lunghezza d'onda, secondo l'equazione (Williams, 2009):

$$L_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda} * \frac{c_1}{\pi} * \lambda^5 * \exp \frac{c_2}{\lambda * T} - 1$$

dove  $L_{\lambda}$  è la radianza ( $W * m^{-2} * ster^{-1} * \mu m^{-1}$ ) per lunghezza d'onda  $\lambda$  ( $\mu m$ ) e temperatura  $T$  ( $^{\circ}K$ ),  $c_1$  e  $c_2$  sono le due costanti definite in precedenza.

Dalla legge di Wien per i corpi grigi è quindi possibile ricavare, sempre sotto l'ipotesi di superficie lambertiana, la Temperatura di radianza totale emisferica, funzione solamente di una costante e della radianza rilevata  $L$  secondo qualsiasi direzione (Brivio et al., 2006):

$$L = \frac{M_{cg}}{\pi} = \frac{\varepsilon * \sigma * T^4}{\pi}$$

da cui

$$T_{cg} = \frac{L * \pi^{1/4}}{\sigma * \varepsilon}$$

## 1.2 L'interazione tra radiazione e atmosfera: le bande MWIR e SWIR

In telerilevamento ci si riferisce alla temperatura radiometrica, che equivale alla temperatura ipotetica che avrebbe un corpo nero che emette una radianza pari a quella rilevata dal sensore; essa differisce dalla temperatura termodinamica (legata all'energia cinetica delle particelle che compongono una massa) perché la sua misura si riferisce all'area inquadrata dall'IFOV del sensore e non a un solo punto sulla superficie.

La temperatura radiometrica è legata alla radianza spettrale rilevata dal sensore tramite la legge di Planck, valida per corpi neri: supponendo di non avere attenuazione della radiazione da parte dell'atmosfera, la temperatura radiometrica  $T$  può essere ricavata dall'irradianza spettrale  $M_\lambda(T)$  dalla (Brivio et al, 2006)

$$T = \frac{c_2}{\lambda * \ln \frac{\epsilon_\lambda * c_1}{\pi * \lambda^5 * M_\lambda(T)} + 1}$$

una volta nota l'emissività spettrale della superficie  $\epsilon_\lambda$ .

La temperatura apparente di un oggetto che risulta dall'inversione della legge di Planck su un'immagine termica non processata corrisponde alla temperatura reale solamente se nelle lunghezze d'onda operative del sensore esso ha un'emissività unitaria, e se l'assorbimento dell'atmosfera nel percorso oggetto-sensore è pari a zero.

In realtà l'atmosfera interagisce con la radiazione incidente sul sensore, in particolare per acquisizioni aeree e satellitari dove le distanze di presa sono più elevate: nella finestra atmosferica dell'IR termico il fattore che provoca maggiormente i fenomeni di diffusione e assorbimento della radiazione è il contenuto di vapore acqueo, mentre sono solitamente più piccoli gli effetti di ozono, anidride carbonica e aerosol.

I principali meccanismi di interazione tra l'atmosfera e le radiazioni sono (Brivio et al., 2006):

- l'assorbimento da parte dei gas costituenti l'atmosfera e delle particelle in sospensione (aerosol), è un processo selettivo che comporta una forte attenuazione della radiazione su alcune lunghezze d'onda, e viene espresso tramite la trasmittività spettrale  $\tau_\lambda$ ;
- la diffusione (o scattering), che si manifesta invece come una componente additiva di radiazione (path radiance). A sua volta essa si suddivide in diffusione di Mie, dovuta a particelle dello stesso ordine di grandezza della lunghezza d'onda come aerosol, fumi e polveri, diffusione di Rayleigh, dovuta invece a particelle molto più piccole, sostanzialmente i gas costituenti l'atmosfera, e diffusione non selettiva dovuta alle particelle più grandi come il vapore acqueo.

Le tecniche di correzione atmosferica di immagini digitali consentono di ricavare, a partire dal valore della radianza al sensore  $L_{sens}$  (radianza Top Of Atmosphere nel caso di osservazioni satellitari), la radianza proveniente da un oggetto al suolo, sia essa emessa o riflessa.

Nell'ipotesi di superficie Lambertiana e di superficie piana isolata, il modello semplificato di trasferimento radiativo è dato da (Brivio et al., 2006):

$$L_{sens} = \tau * \epsilon * M(T) + L_U + 1 - \epsilon * \tau * L_D$$

dove  $M(T)$  è l'emittanza della superficie considerata corpo nero a temperatura  $T$ ,  $L_U$  è la radianza ascendente e  $L_D$  è la radianza discendente.

Solitamente per la ottenere delle misure accurate delle proprietà termiche delle superfici osservate è quindi necessario correggere le immagini dagli effetti atmosferici, stimando i valori di:

- radianza atmosferica ascendente (o upwelling) che viene

emessa dallo strato di atmosfera tra la superficie e il sensore;

- irradianza dell'atmosfera discendente, proveniente da tutta la superficie emisferica attorno al punto, che viene riflessa dalla superficie;
- trasmissività atmosferica verso l'alto e verso il basso.

La relazione precedente, e tutti i fattori radiativi che interessano il modello, sono validi per superfici lambertiane, ovvero nell'ipotesi che il campo di radiazione osservato sia isotropo; in realtà le superfici naturali hanno comportamento anisotropo, e la radiazione uscente non è costante in tutte le direzioni d'osservazione (Brivio et al., 2006).

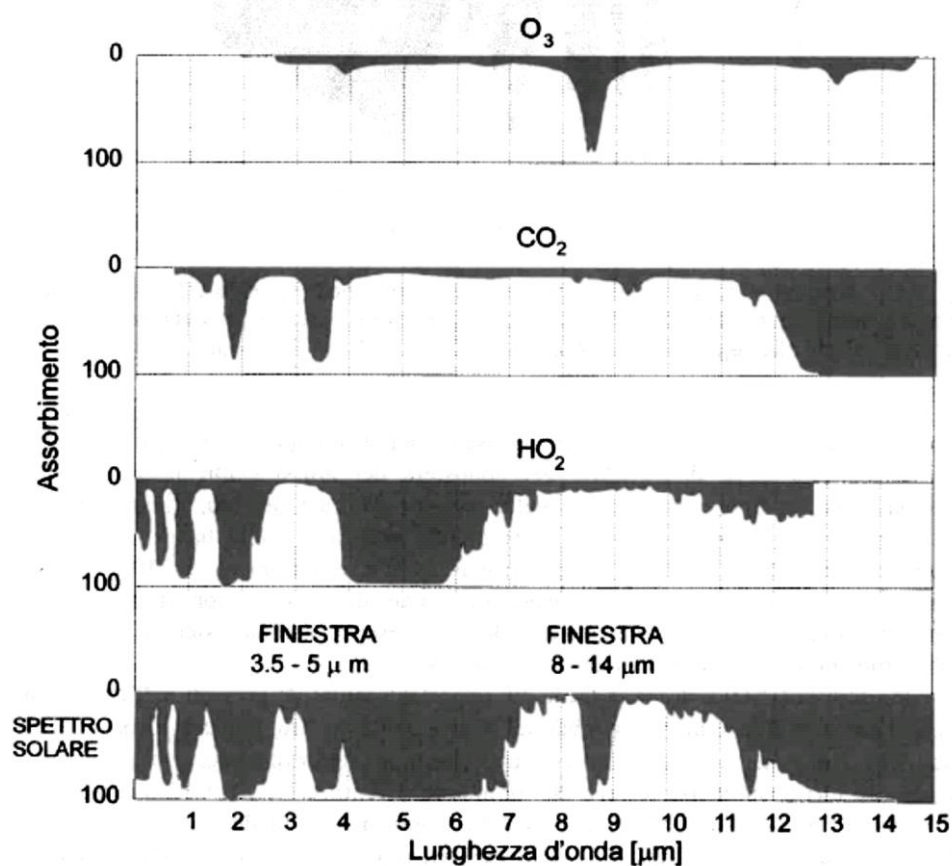
I metodi di correzione atmosferica si suddividono in:

- image based, che ricavano le informazioni sulle proprietà atmosferiche direttamente dalle immagini che si vogliono correggere e non richiedono misurazioni in situ (sono metodi piuttosto rapidi ma solitamente meno accurati dei seguenti);
- modelli di trasferimento radiativo, che invece sfruttano le teorie sul trasferimento radiativo per modellare i vari flussi energetici che coinvolgono superficie e atmosfera tramite RTC (Radiative Transfer Code). Essi richiedono una serie di informazioni ottenute in situ contemporaneamente all'acquisizione remota, come le proprietà ottiche dell'atmosfera (nel caso non fossero disponibili, possono essere usati profili atmosferici standard rappresentativi di alcune situazioni climatiche). I modelli di trasferimento radiativo sono più accurati e ottengono risultati ottimali con parametri di input esaustivi e precisi.

In fig. 1.6 sono mostrati i coefficienti tipici di assorbimento di alcuni dei componenti principali che costituiscono l'atmosfera terrestre (Ozono, Biossido di Carbonio e vapore acqueo) al

variare della lunghezza d'onda, e l'effetto complessivo che hanno sulla trasmittanza atmosferica nella regione dello spettro elettromagnetico tra 0 e 15  $\mu\text{m}$ . Le regioni spettrali che presentano un basso coefficiente d'assorbimento vengono chiamate finestre atmosferiche.

Le finestre atmosferiche che vengono utilizzate nell'acquisizione di immagini infrarosse a causa dell'elevato valore di trasmissività dell'atmosfera sono principalmente due: la prima è compresa tra 2 e 5  $\mu\text{m}$  (Medium Wave InfraRed) e l'altra tra gli 8 e i 14  $\mu\text{m}$  (Long Wave InfraRed).



*Fig. 1.6 – Assorbimento dei principali componenti atmosferici nella regione VNIR ed effetto combinato degli stessi (da Brivio et al., 2006)*

Esistono alcuni casi per cui le bande dell'IR medio (MWIR) o ad onde corte (SWIR) risultano particolarmente performanti, ad esempio nell'analisi di fenomeni che coinvolgono superfici a temperatura elevata ( $>200^{\circ}\text{C}$ ) come incendi o eruzioni vulcaniche;



inoltre alcuni sensori satellitari offrono in queste bande una risoluzione spaziale più elevata (si considerino le bande SWIR e TIR dell'ASTER).

In effetti sono diversi i fattori che influiscono sulla scelta della finestra atmosferica infrarossa su cui effettuare le misurazioni (Williams, 2009):

- radianza emessa dalla superficie; per i corpi a temperatura ambiente l'intensità totale è maggiore nel LWIR, sebbene la sua variazione percentuale al variare di 1° della temperatura del corpo sia maggiore nel MWIR (vedi tab. 1.1);
- radiazione solare: parte di essa è concentrata nelle frequenze nel MWIR, il che per alcune applicazioni (principalmente effettuate con acquisizioni diurne) permette di ottenere informazioni aggiuntive sui materiali, anche se essa rende però più complessa la misura accurata della temperatura;

**TABLE 1.1**  
**Radiance and Contrast for Different Thermal Wavelength Bands**  
**for a Surface at Ambient Temperature (20°C)**

Wavelength Band	Radiance in watts/m <sup>2</sup> /steradian	Contrast (% Change in Radiance for 1°C Temperature Difference)
3–5 μm	4.06	37.7
8–12 μm	93.4	16.9
8–14 μm	133.2	15.7

*Tab 1.1 – Variazione nella radianza emessa per un incremento di 1°C della temperatura (da Williams, 2009)*

- trasmissione atmosferica: specialmente per lunghe distanze la composizione dell'atmosfera incide sulla trasmissività della stessa alle diverse frequenze; in generale attraverso fumo e foschia la banda tra gli 8 e i 14 μm risulta più adeguata;

- considerazioni tecnologiche e commerciali: le performance, i materiali costruttivi e le caratteristiche dei detector sono differenti per le due bande, così come risulta variabile il costo della termocamera.

### **1.3 La termografia: caratteristiche dei sensori infrarossi, funzionalità delle termocamere, applicazioni**

Un sensore termico può essere utilizzato per misurare la temperatura di una superficie d'interesse o per fornire una mappa bidimensionale della distribuzione di temperatura in una scena; i sensori infrarossi sono di tipo passivo, poiché la radiazione che viene rilevata è emessa dall'oggetto stesso (il che consente l'acquisizione notturne delle scene). Inoltre, alcuni target d'interesse che si trovano a temperatura maggiore rispetto al contesto sono facili da identificare perché vengono visualizzati con elevato contrasto sulle immagini termiche.

Il fenomeno di scattering atmosferico a lunghezze d'onda elevate come quelle dell'Infrarosso termico è notevolmente meno influente sulle immagini, il che permette la risoluzione degli oggetti in condizioni di fumo o nebbia leggera, ove la visibilità nelle bande del visibile è notevolmente compromessa.

Il primo impeto allo sviluppo dei sensori nel termoinfrarosso è stato dato dalle possibili applicazioni in campo militare; il primo prototipo di sensore infrarosso (di tipo lineare) fu sviluppato proprio per applicazioni militari nel 1946 (Allison, 2007).

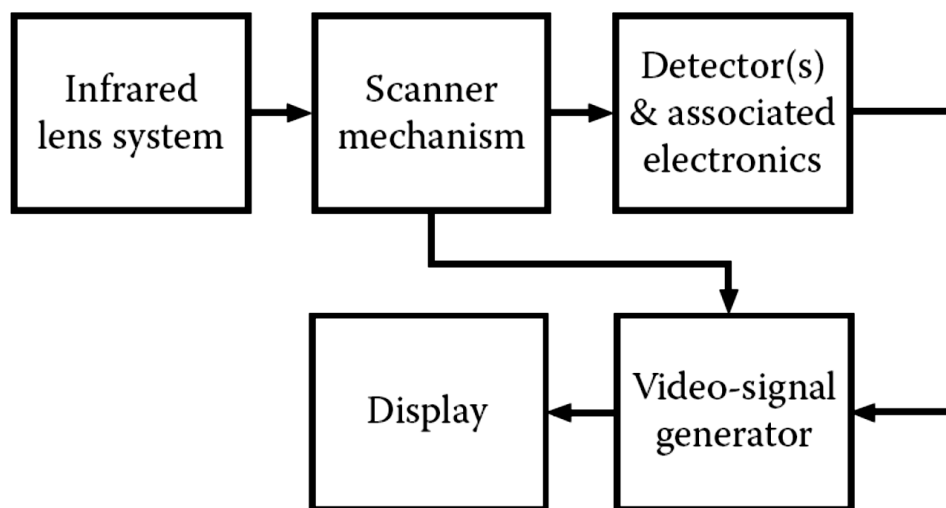
In seguito la loro utilità è stata dimostrata in una vasta gamma di applicazioni civili ed industriali ed a tutt'oggi i campi d'applicazione sono in continua espansione parallelamente allo sviluppo tecnico e tecnologico (Williams, 2009).

Il sensore infrarosso converte la radiazione infrarossa incidente su di esso in un segnale elettrico la cui intensità dipende dal tipo di detector e dalle componenti elettroniche e ottiche della camera; esso poi viene convertito mediante un modello di correzione e l'inversione della legge di Planck in un valore di temperatura, che rappresenta la temperatura superficiale

dell'oggetto.

Gli elementi essenziali che compongono un thermal imager sono illustrati in fig. 1.7. Essi sono (Williams, 2009):

- un sistema ottico che possa formare un'immagine della radianza rilevata nelle lunghezze d'onda dell'infrarosso termico;
- uno o più detectors che convertano questa radiazione in un segnale elettrico quantificabile;
- un eventuale meccanismo di scansione che acquisisca l'immagine secondo percorsi regolari (nel caso di sensori non matriciali);
- un processore elettronico (convertitore A/D) che elabori la risposta del detector e converta le radianze rilevate in matrici bidimensionali visualizzabili come immagini;
- un display che riproduca un'immagine termica della scena acquisita.



*Fig. 1.7 – Schema dei componenti di una termocamera all'infrarosso (da Williams, 2009)*

Il sistema ottico, rispetto a quello di una camera che opera nel visibile, differisce sostanzialmente per i materiali che formano le

lenti, che devono garantire un'elevata trasmissività nelle lunghezze d'onda dell'Infrarosso.

Il principio di funzionamento degli specchi è lo stesso, con la differenza che anche in questo caso si usano dei materiali appositi per realizzare il rivestimento riflessivo e la pellicola protettiva; quest'ultima è necessaria per limitare il cosiddetto narcissus effect (dovuto all'alto indice di rifrazione di materiali come il Germanio) che si manifesta come un alone opaco o luminoso al centro delle immagini termiche. La fig. 1.8 rappresenta la trasmissività di una lente in Germanio con e senza pellicola protettiva anti-riflesso nella banda dell'Infrarosso.

Le aberrazioni monocromatiche si possono limitare realizzando lenti asferiche piuttosto che sferiche, pratica molto meno complessa per materiali come il Silicene e il Germanio.

Il meccanismo di scansione, se presente, è solitamente costituito da uno specchio rotante in una delle tre configurazioni illustrate in fig. 1.9, denominate rispettivamente *image space scanner*, *object space scanner* e *afocal scanner* in base alla posizione di questo sistema rispetto al sistema ottico e al detector.

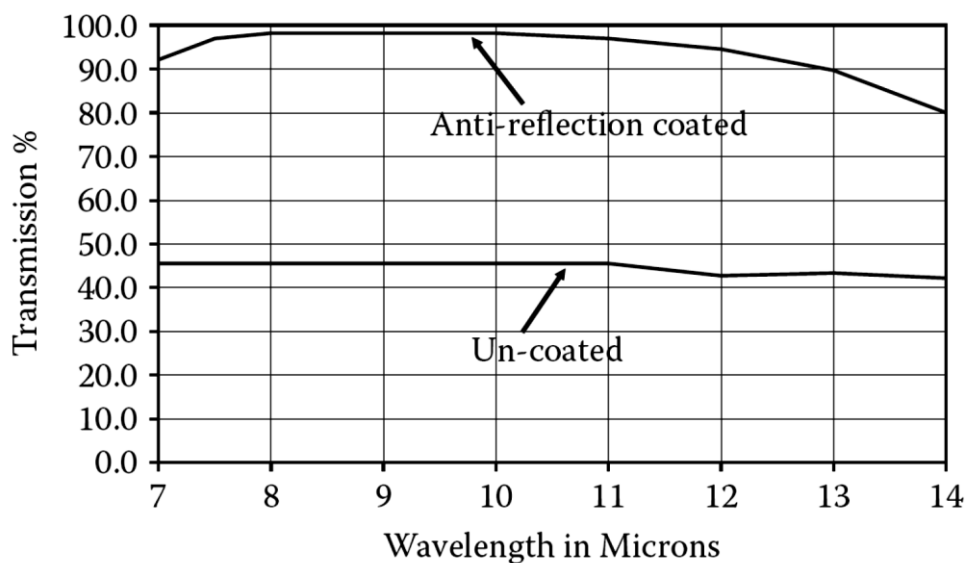


Fig. 1.8 – Trasmissività con e senza pellicola anti-riflesso per una lente in Germanio (da Williams, 2009)

Le potenzialità di una camera termica sono strettamente legate al tipo di sensore (detector) e alle sue prestazioni: le specifiche più rilevanti sono la regione d'acquisizione e la corrispondente risposta spettrale del sensore, la sua risoluzione spaziale, la sensibilità termica e la presenza o meno di un sistema refrigerante.

I sensori termici possono essere di due tipi: i *thermal detectors*, in cui si misura la radianza tramite l'innalzamento di temperatura dovuto alla radiazione IR che incide sul singolo elemento del detector, e i *quantum detectors*, nelle quali l'energia assorbita comporta invece una differenza di potenziale elettrico misurabile all'interno dell'elemento sensibile.

I sensori quantici sono solitamente costituiti da semiconduttori la cui conducibilità elettrica (e di conseguenza la differenza di potenziale generata) è influenzata dalla radiazione infrarossa incidente. Essi hanno maggiore sensibilità termica, ma necessitano di un sistema refrigerante (sino a 195 °K per i sensori MWIR, anche 75 °K per sensori nel LWIR) che incide pesantemente sulla complessità del sistema e sui suoi costi. I sensori quantici possono essere CMT (Cadmium Mercury Telluride), Indium Antimonide (InSB), Platinum Silicide (PtSi) o Quantum Well (QWIP) per sensori di tipo matriciale.

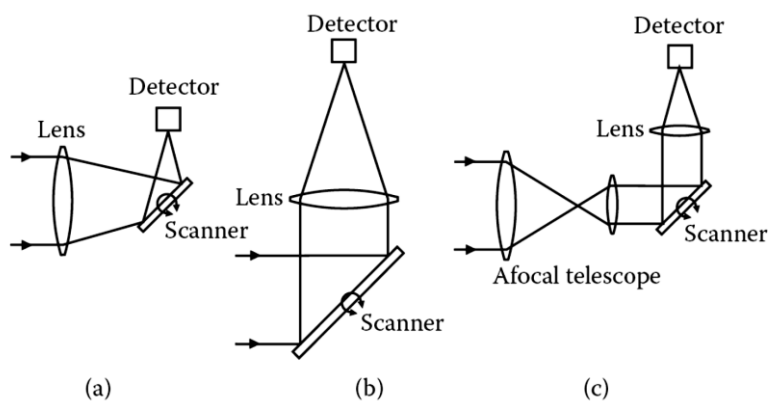
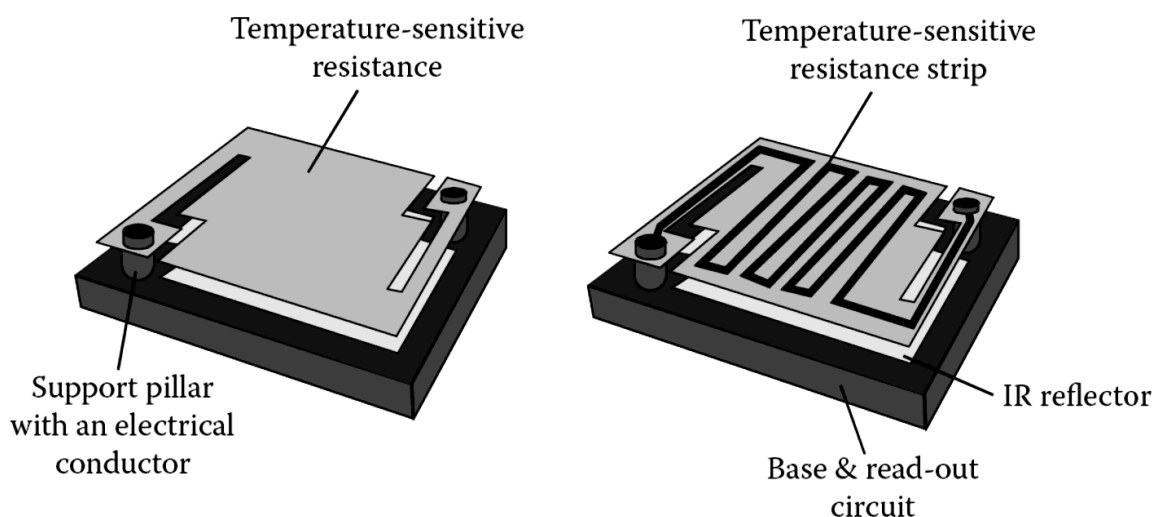


Fig. 1.9 – Meccanismi di scansione: (a) image space (b) object space (c) afocal (da Williams, 2009)

I *thermal detectors* sono invece largamente utilizzati per sensori di tipo matriciale (staring arrays), e avendo frequenze di risposta elevate (25 - 50 Hz) consentono la registrazione di filmati radiometrici. Per eseguire misurazioni di temperatura in questi sistemi non è necessario un sistema di refrigerazione ma solo un sistema di controllo della temperatura abbinato ad un modello di correzione dell'output. I sensori di questo tipo sono al Pyrovidicon, ferroelettrici/piroelettrici, bimetallic cantilever arrays o microboleometri resistivi, in cui si sfrutta la variazione della resistività elettrica di un materiale inserito in strisce sottili in un supporto in silicone (*fig. 1.10*).

I sistemi di raffreddamento o controllo della temperatura del sensore sono di quattro tipi: bulk cooling, termoelettrico o di Peltier, di Joule-Thomson o Stirling engine. La scelta del sistema dipende dalla temperatura operativa che il sensore deve raggiungere, e dalla complessità e dimensione della termocamera (Williams, 2009).



*Fig. 1.10 – Thermal detector: boleometro resistivo (da Williams, 2009)*

Nel campo industriale e civile i sensori termici devono spesso fronteggiare condizioni ambientali ostili, e devono perciò devono

essere progettati appositamente per resistere a vibrazioni, polveri, alte temperature, agenti aggressivi. Di frequente il sensore termico viene installato dentro degli appositi contenitori protettivi equipaggiati con una finestra per l'inquadratura. Anch'essa deve essere in materiale adeguato, con un'elevata trasmissività nelle bande d'interesse in modo da non essere anch'essa fonte di radiazione termica (Williams, 2009).

Per alcune applicazioni, specialmente in campo militare e di sorveglianza, le camere termiche sono progettate in modo da poter essere installate su veicoli ed essere controllate con sistemi remoti. Infine, per alcune termocamere è prevista la possibilità di utilizzare obiettivi differenti: lenti con un'elevata lunghezza focale consentono di acquisire anche a distanze elevate (seppur con i problemi legati allo scattering dell'atmosfera), mentre lunghezze focali più basse permettono, a parità di sensore e distanza di presa, di aumentare il Field Of View della camera e quindi di acquisire scene con dimensioni maggiori.

Applicazioni particolari richiedono requisiti specifici: per esempio, i sensori all'infrarosso utilizzati dai vigili del fuoco devono fronteggiare condizioni estremamente avverse (alte temperature, fumo) mantenendo leggerezza, facilità di utilizzo e trasporto e devono poter rilevare temperature molto elevate (anche superiori a 1000°C) pur mantenendo un buon contrasto anche sulle parti della scena con bassa temperatura.

Tra le opzioni di misura, i *thermal imagers* per usi civili ed industriali offrono la possibilità di impostare interattivamente dei marker o delle aree di interesse sull'immagine, in modo da ottenere in tempo reale i valori di temperatura statistici calcolati dalla termocamera al loro interno (valore puntuale, medio, massimo, minimo e deviazione standard). Un'ulteriore possibilità offerta è quella di alterare i parametri impostati per l'intera scena



in corrispondenza di queste aree, così da tenere in considerazione le caratteristiche del materiale e la sua posizione rispetto al centro di presa.

Molte termocamere attualmente in commercio hanno anche la possibilità di acquisire, contemporaneamente alle immagini nell'infrarosso, anche delle immagini nella regione del visibile sulla stessa area: solitamente il sensore ottico ha una risoluzione maggiore rispetto al sensore termico e le immagini ottiche vengono visualizzate con maggior contrasto, permettendo così di identificare con maggiore precisione gli oggetti d'interesse, di posizionarvi sopra dei marker e di sovrapporre alle immagini termiche per analisi più complete (alcune modelli offrono la funzione di image fusion in tempo reale). Nelle termocamere equipaggiate con due sistemi per l'acquisizione nell'ottico e nell'infrarosso gli assi ottici possono essere allineati o coincidenti (tramite un beam splitter, che riflette la radiazione infrarossa sul sensore termico e trasmette la radiazione nel visibile al sensore ottico). In questo caso l'asse ottico è comune, e la posizione degli oggetti sarà la stessa nelle due immagini indipendentemente dalla distanza dalla camera.

I software per il processing delle immagini termiche sono sviluppati appositamente per le applicazioni cui sono destinati: è importante decidere quale software acquistare per l'utilizzo della termocamera in base agli scopi per cui verrà utilizzata e alle esigenze specifiche del caso. In ogni caso in seguito all'esportazione delle immagini in formato adeguato è possibile far fronte ad eventuali carenze del software originale con qualunque software di image processing, che permette di effettuare qualsivoglia operazione sulle immagini digitali in base alle proprie specifiche esigenze.

Risulta di fondamentale importanza anche la sensibilità del

sensore alle variazioni di temperatura: la variazione nella radianza emessa da una superficie a 18°C o 22 °C è infatti solamente il 7% della radianza totale rilevata dal sensore per la stessa superficie a 20° (Williams, 2009).

Per effettuare analisi multitemporali di change detection (ad esempio per monitorare componenti di stabilimenti industriali) è importante acquisire le immagini dalla stessa posizione e con condizioni ambientali quanto più possibile simili, in modo da minimizzare gli errori sulle misurazioni dovuti alle variazioni nella distanza e nell'angolo di presa (Williams, 2009); è anche possibile per alcuni sistemi acquisire un immagine in condizioni di funzionamento standard e utilizzarla come immagine di riferimento per le acquisizioni successive.

Le specifiche tecniche più importanti nella scelta della termocamera più adatta al proprio scopo sono suddivise per tipologia (Williams, 2009; Lanzoni, 2010):

- **caratteristiche ottiche e del sensore:** principalmente il tipo di sensore e la sua risoluzione spaziale, il Field Of View, la lunghezza focale della lente, la distanza minima di messa a fuoco, la frame rate per l'acquisizione di video, la possibilità di autofocus e l'eventuale funzione di zoom digitale;
- **caratteristiche termiche:** in particolare la banda spettrale in cui acquisisce, il range di temperatura operativo, l'accuratezza nella misura della temperatura, il Noise Equivalent Temperature Difference (NETD);
- **funzioni di misura:** funzioni di visualizzazione in B/N e a colori, palette disponibili, impostazione dei valori minimi e massimi di Temperatura, compensazione dell'emissività, correzione per la temperatura riflessa e per gli effetti atmosferici, possibilità di impostare marker e aree di

interesse, possibilità di acquisire a intervalli temporali regolari;

- **display e interfaccia:** tipo e risoluzione del display, memoria interna e aggiuntiva, connessioni esterne, formati di salvataggio, funzionalità del software per il processing;
- **caratteristiche fisiche e alimentazione:** dimensioni, peso, temperatura operativa, resistenza a vibrazioni, urti o umidità, eventuali sistemi di refrigerazione, possibilità di installazione su treppiede, tipo di batteria, durata e tempi di ricarica.

Le applicazioni della termografia, e di conseguenza le performance richieste ai sensori, sono suddivise in due aree principali (Williams, 2009):

- sorveglianza e monitoraggio (ove risulta primaria l'abilità di riconoscere target che mostrano piccole differenze di temperatura);
- misura della temperatura in applicazioni industriali e scientifiche (per cui sono importanti la risoluzione radiometrica, il dettaglio e la possibilità di impostare i parametri caratteristici dei target).

La termografia (aerea o terrestre) consiste nell'acquisizione ed elaborazione di mappe bidimensionali di radianza nell'infrarosso, in modo da evidenziare delle differenze di temperatura negli oggetti che possono essere dovute a cause naturali o generate deliberatamente per analizzare un processo specifico. Essa può essere quindi utilizzata in diversi settori (Williams, 2009):

- **nelle applicazioni industriali:** viene utilizzata in edilizia per l'ispezione di edifici e strutture nell'identificazione di difetti progettuali, danni all'isolamento termico o altri problemi strutturali, in quanto con immagini termiche risulta semplice individuare le aree con maggiore perdita di calore.

Gli involucri edilizi possono subire danni anche a causa di flussi indesiderati d'aria in corrispondenza dei giunti tra l'interno e l'esterno: essi possono essere identificati con le prove blower door, in cui si pressurizza positivamente o negativamente l'edificio e si analizzano tramite termografia la posizione e l'intensità di questi flussi. Acquisizioni infrarosse da piattaforma aerea risultano particolarmente utili nell'individuazione d'infiltrazioni d'umidità sulle coperture degli edifici dovute a difetti o deterioramento dell'isolamento.

La termografia, permettendo di monitorare la temperatura di motori, fusibili, cablaggi elettrici e componenti in generale ha visto anche largo uso in diversi tipi di impianti industriali, sia per la manutenzione che per l'individuazione di guasti. Nell'industria chimica è stata utilizzata per il controllo di corrosione o blocco nelle tubazioni e per controllare il grado di riempimento di grandi vasche o cisterne. Nella produzione e distribuzione di energia elettrica permette di identificare guasti o difetti degli isolanti nelle linee ad alto voltaggio, di individuare trasformatori malfunzionanti, di controllare lo stato di funzionamento delle reti. Nell'industria siderurgica la termografia viene utilizzata anche per il monitoraggio continuo delle condizioni di esercizio di fornaci ed elementi a contatto con metallo fuso, ove difetti nell'isolamento comportano rilevanti innalzamenti di temperatura dei componenti. Infine per l'ispezione di pannelli compositi, che devono soddisfare determinati requisiti di leggerezza e resistenza (es. nell'industria aeronautica), si pone una lampada calda da uno dei lati del pannello e si acquisisce con una termocamera dall'altro: per la presenza di eventuali

vuoti o difetti è visualizzata come un'area più fredda (a causa della ridotta conduttività termica).

- **per scopi civili e militari:** le possibilità offerte *nella target detection and tracking*, la facilità nell'identificare corpi, oggetti e mezzi con temperatura maggiore rispetto al loro contesto, la visibilità anche attraverso fumo e foschia senza bisogno di illuminazione esterna, la difficoltà nel camuffamento nelle lunghezze d'onda dell'infrarosso fanno della termografia uno strumento eccezionale per questo tipo di applicazioni. Essa è stata utilizzata in campo civile per tracciare gli spostamenti di criminali da piattaforme aeree, per l'individuazione di forme di vita durante missioni di soccorso, per sorvegliare aree pubbliche o private.
- **in applicazioni mediche e biologiche:** alcune patologie o condizioni cliniche possono causare un innalzamento nella temperatura di alcuni tessuti, ed in certi casi esso può essere evidenziato da immagini acquisite nell'infrarosso (ad esempio, durante l'epidemia di SARS gli aeroporti si equipaggiarono di termocamere per identificare i passeggeri che avevano una temperatura superiore alla media a causa di fenomeni febbrili). Anche variazioni nell'emissività della pelle (pari solitamente a 0,98) possono essere dovute a determinate condizioni cliniche o a sostanze cosmetiche applicate su di essa. La termografia in medicina risulta utile per la diagnosi, la localizzazione o il controllo di obesità, ipo- ed iper-termia, stati di infezione, forme tumorali, problemi vascolari, problemi muscolari.
- **in applicazioni avanzate e specialistiche:** le immagini termiche sono state utilizzate anche per l'analisi di oggetti sepolti (non solo tubazioni interrate, ma anche in siti archeologici), per il monitoraggio di affreschi e beni

culturali, per l'identificazione rapida di incendi attivi, per il controllo dell'attività vulcanica o geotermica, per l'individuazione di campi elettrici e/o magnetici, per la Thermal Wave Imaging (tecnica non distruttiva che consente di analizzare la struttura interna dei materiali basata sulla propagazione di onde termiche all'interno della stessa), per analisi di stress termoelastico (in cui si correla lo stress nelle diverse parti di una struttura soggetta a trazione o compressione alle piccole variazioni di temperatura che possono essere rilevate).

Le possibilità di integrazione della termografia con tecniche di rilevamento tradizionalmente proprie della Geomatica, l'uso per essa di approcci adottati normalmente nel campo della fotogrammetria aerea o del telerilevamento, ed infine le possibilità di utilizzo del dato termico georeferenziato all'interno di applicazioni GIS o comunque a base metrica, sono elementi di notevole interesse che possono certamente trovare un importante riscontro applicativo e/o di ricerca.

## 1.4 La risposta spettrale del sensore

La risposta spettrale del sensore  $R(\lambda)$  è definita come il segnale di output del sensore corrispondente ad un flusso incidente unitario al variare della lunghezza d'onda, come indicato dall'equazione seguente:

$$R(\lambda) = \frac{dS}{d\phi(\lambda)}$$

dove  $S$  è il segnale di output e  $\phi$  è il flusso incidente sul detector (W).

La risposta spettrale del sensore può anche essere normalizzata, in modo da essere espressa in forma adimensionale:

$$R'(\lambda) = \frac{R(\lambda)}{R(\lambda)_{max}}$$

dove  $R(\lambda)_{max}$  è il valore massimo della risposta spettrale del sensore. Delle definizioni analoghe possono essere date anche per il sistema ottico e l'eventuale filtro che compongono una camera termica: la risposta spettrale totale del sistema è data dal prodotto delle risposte spettrali dei singoli componenti, come descritto dalla relazione che segue (Allison, 2007):

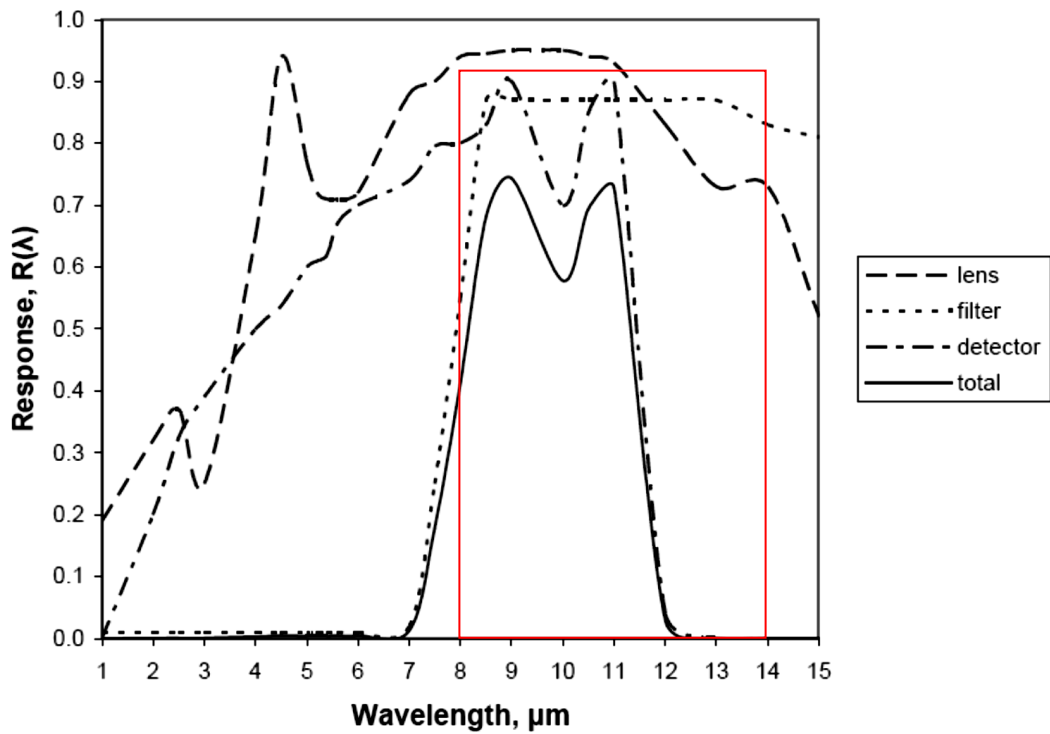
$$R(\lambda) = R(\lambda)_{lens} * R(\lambda)_{filter} * R(\lambda)_{detector}$$

Le risposte spettrali tipo dei vari componenti di una termocamera che opera nelle lunghezze d'onda dagli 8 ai 14  $\mu\text{m}$  sono mostrate in fig. 1.11, così come la risposta spettrale di un sensore ideale (con risposta normalizzata unitaria su tutte le lunghezze d'onda).

Per effettuare analisi quantitative sui valori di radianza registrata dal sensore bisogna disporre sia delle immagini acquisite in formato RAW (ovvero con i valori di DN non processati) che della risposta spettrale complessiva del sistema. Una limitazione notevole delle termocamere utilizzate per la sperimentazione del capitolo 4, ed in particolare dei software d'elaborazione forniti

dalle case costruttrici, è stata l'impossibilità di memorizzare le immagini RAW di radianza al sensore: esse sono disponibili solamente in valori di Temperatura, e sono quindi state precedentemente processate secondo l'algoritmo di correzione interno alla camera. Le case costruttrici inoltre, nonostante le ripetute richieste, non hanno fornito neanche le risposte spettrali normalizzate dei due sensori.

*Fig. 1.11 – Risposta spettrale normalizzata di lente, filtro, detector e*



*risposta spettrale ideale di un sensore operante tra gli 8 e i 14  $\mu\text{m}$ .*



## **2. Il Telerilevamento Termico da piattaforma satellitare**

### **2.1 Caratteristiche, potenzialità e limiti, sensori disponibili**

L'utilizzo del dato termico da piattaforma satellitare ha raggiunto nuovi orizzonti con l'avvento negli ultimi decenni di sensori operanti dallo spazio capaci di acquisire immagini nell'IR termico con una moderata risoluzione spaziale: tra essi si ricordano il sensore ASTER e MODIS operanti sul satellite Terra della NASA (con risoluzione spaziale al nadir pari rispettivamente a 90m e 1000 m), e il sensore ETM+ operante sul satellite Landsat 7 (con risoluzione di 60m nel termico) che ha sostituito il precedente Thematic Mapper (che forniva invece una risoluzione di 120m).

Ci sono due modi fondamentali con cui il TIR permette una migliore comprensione dei fenomeni che avvengono sulla superficie terrestre:

- tramite la misura della temperatura superficiale e la sua correlazione con le proprietà specifiche del territorio;
- tramite la correlazione tra la temperatura della superficie e i flussi energetici che caratterizzano i fenomeni che avvengono su di essa.

Le principali difficoltà per l'analisi e la modellazione tramite dati termici remote-sensed dei processi che interessano la superficie terrestre consistono (Quattrocchi & Luvall, 2000):

- nella calibrazione e trasformazione della radianza misurata in grandezze fisiche consistenti;
- nell'abilità limitata di stimare con precisione i flussi energetici per superfici terrestri complesse, composte da vegetazione, specchi d'acqua, suolo nudo e tessuto urbano con differenti caratteristiche;

- la capacità di individuare e rimuovere gli effetti delle coperture nuvolose.

L'utilizzo su larga scala di immagini termiche per l'analisi dei *land surface processes* è stato finora limitato per cinque ragioni fondamentali (Quattrocchi & Luvall, 2000):

- la letteratura scientifica è piuttosto frammentata, e si rivolge a settori disciplinari differenti;
- ciò comporta una sottovalutazione del potenziale del dato infrarosso da parte della comunità scientifica mondiale;
- le teorie che stanno alla base della radiazione infrarossa e del telerilevamento termico sono percepite dai potenziali utenti e ricercatori come piuttosto complesse;
- le difficoltà di calibrazione e correzione delle immagini termiche derivate rende difficile derivare grandezze fisiche consistenti;
- nonostante l'incremento nel numero, nelle prestazioni e nella disponibilità dei sensori operanti nel campo dell'IR termico permane la percezione che siano dati costosi e di difficile reperimento.

Possono essere individuati principalmente sei aree tematiche in cui i dati infrarossi telerilevati sono stati utilizzati per l'analisi delle caratteristiche del territorio e dei processi che avvengono su di esso (Quattrocchi & Luvall, 2000):

- caratterizzazione del territorio;
- analisi basate sull'inerzia termica dei suoi componenti;
- stima dei flussi energetici;
- studio dell'evaporazione/evapotraspirazione/umidità dei suoli;
- misura dei bilanci e flussi energetici sulla superficie;
- bilanci energetici in aree forestali.

Nonostante rispetto al passato ci siano già stati notevoli progressi

tecnologici, per consentire analisi e modellazioni robuste dei processi energetici che avvengono sulla superficie terrestre persiste la necessità di sistemi satellitari operanti nell'Infrarosso Termico che combinino le potenzialità offerte dall'acquisizione multispettrale con una risoluzione spaziale adeguata allo studio di fenomeni su microscala ( $\leq 1\text{m}$ ), su scala locale ( $\leq 20\text{ m}$ ) o su scala regionale ( $\leq 300\text{ m}$ ). Un'altra limitazione che sarebbe opportuno superare è la risoluzione temporale di acquisizione, che per l'analisi di fenomeni termici dinamici dovrebbe essere abbastanza elevata da acquisire serie di immagini nel breve termine (giornaliere) o addirittura in continuo (orarie).

Le analisi basate su piattaforma satellitare differiscono da quelle aeree per molteplici aspetti, tra cui si possono citare:

- la risoluzione spaziale minore, a causa della minor quantità di energia proveniente dagli oggetti al suolo nelle frequenze dell'Infrarosso Termico rispetto alle frequenze del visibile, e del conseguente aumento nella dimensione degli elementi sensibili dei sensori;
- la maggiore risoluzione spettrale offerta, in quanto i sensori satellitari (es. ASTER) acquisiscono generalmente più di una singola banda nella regione TIR;
- la disponibilità di immagini sulle stesse zone a frequenze temporali regolari, che permette di effettuare analisi di change detection;
- la necessità di effettuare correzioni atmosferiche sui valori di radianza più marcate, a causa della maggiore interazione tra i componenti dell'atmosfera e la radiazione rilevata dai sensori;
- una copertura spaziale notevolmente più elevata, che permette di effettuare analisi anche a scala locale e regionale;

- il costo delle immagini notevolmente minore a parità di superficie coperta, senza la necessità di pianificare i rilievi e di disporre di una piattaforma aerea.

Nella tab. 2.1 sono illustrati i principali satelliti equipaggiati con sensori operanti nell'IR termico con le relative bande d'acquisizione, e la risoluzione spaziali e la risoluzione radiometrica delle immagini ottenute.

Satellite - Sensore	# Canale e banda spettrale [ $\mu\text{m}$ ]	Risoluzione geometrica al nadir [m]	Risoluzione radiometrica
METEOSAT - MVIRI	3    10.5 - 12.5	5000 m	8 bit
GMS - VISSR	3    10.5 - 11.5	5000 m	8 bit
	4    11.5 - 12.5	5000 m	8 bit
NOAA - AVHRR	4    10.3 - 11.3	1100 m	10 bit
	5    11.5 - 12.5	1100 m	10 bit
Envisat - AATSR	6    10.4 - 11.3	1000 m	12 bit
	7    11.5 - 12.5	1000 m	12 bit
TERRA - MODIS	29    8.40 - 8.70	1000 m	12 bit
	31    10.780 - 11.28	1000 m	12 bit
	32    11.77 - 12.27	1000 m	12 bit
	33    13.185 - 13.485	1000 m	12 bit
TERRA - ASTER	10    8.125 - 8.475	90 m	12 bit
	11    8.475 - 8.825	90 m	12 bit
	12    8.925 - 9.275	90 m	12 bit
	13    10.25 - 10.95	90 m	12 bit
	14    10.95 - 11.65	90 m	12 bit
Landsat - ETM+	6    10.4 - 12.5	60 m	8 bit

*Tab. 2.1 – Principali sensori satellitari operanti nell'Infrarosso termico  
(da Brivio et al., 2006)*

## 2.2 Calcolo della LST e ruolo dell'emissività

Gli algoritmi per il calcolo della temperatura variano secondo il tipo di sensore utilizzato, in particolare in base al numero di bande risolte: se il sensore acquisisce una singola banda nella regione infrarossa si utilizzano solitamente i mono-window algorithms, che necessitano solitamente di una conoscenza accurata della distribuzione orizzontale e verticale di temperatura atmosferica e vapore acqueo. I metodi split-window invece utilizzano due o più bande acquisite dal medesimo sensore, come avviene per alcune delle piattaforme satellitari più conosciute (es. il sensore ASTER sulla piattaforma Terra), o due acquisizioni con diversa configurazione geometrica (Williams, 2009).

Nella regione dell'infrarosso termico (8-14  $\mu\text{m}$ ) il sensore rileva prevalentemente la radiazione emessa dalla superficie terrestre; il calcolo della temperatura di corpo nero  $T_B$  (*Brightness Temperature*) degli oggetti al suolo è basato sull'inversione della legge di Planck (Smith, 2005):

$$T_B = \frac{h * c}{k * \lambda} \frac{1}{\ln \frac{2 * h * c^2 * \lambda^{-5}}{B_\lambda} + 1}$$

dove  $h=6,62*10^{-34}$  [J\*s],  $k=1,38*10^{-23}$  [J/deg],  $c=2,99792*10^8$  [m/s],  $\lambda$  è la lunghezza d'onda [m],  $B_\lambda$  è la radianza di corpo nero misurata [ $\text{W}/\text{m}^3\text{sr}$ ],  $T_B$  è la Temperatura di Brillanza [K].

Dalla  $T_B$ , una volta definita l'emissività della superficie  $\varepsilon$ , è possibile calcolare la temperatura superficiale  $T_S$  mediante la relazione

$$T_S = \frac{T_B}{\varepsilon^{1/4}}$$

E' da notare come non sia possibile dalle relazioni appena

illustrate ricavare simultaneamente sia la temperatura che l'emissività dei pixels dell'immagine in quanto, anche con un numero  $n$  di bande spettrali, il sistema rimane indeterminato essendo incognite la temperatura superficiale e gli  $n$  valori di emissività nelle bande (Becker, 1980). Visto che il range di variazione dell'emissività è piuttosto piccolo rispetto a quello della Temperatura, di solito si stima LSE (Land Surface Emissivity) dalle bande dell'Infrarosso Termico e poi si procede con il calcolo della LST (Bitelli & Conte, 2011a).

Van et al. (2009) presentano diverse metodologie per il calcolo della Land Surface Temperature (LST) su immagini Landsat e Aster (tra cui uno basato sul valore dell'NDVI), enfatizzando l'importanza delle correzioni atmosferiche per ricavare la radianza Top Of Atmosphere e dei valori dell'emissività delle superfici per trasformare la *Brightness Temperature* in temperatura superficiale corretta. Anche Yang & Liu (2005) descrivono diversi algoritmi per il calcolo della temperatura superficiale al suolo da immagini Landsat, finalizzati all'analisi del fenomeno dell'UHI nella città di Lanzhou (nella Cina nord-occidentale).

Tra gli algoritmi utilizzati viene descritto il mono-window algorithm, che necessita di una singola banda nell'Infrarosso termico per il calcolo della LST. Il metodo, sviluppato appositamente per il sensore Landsat, calcola la temperatura  $T_s$  in base all'equazione

$$T_s = \frac{1}{C} * a * 1 - C - D + b * 1 - C - D + C + D * T_{sens} - D * T_a$$

dove

$$C = \tau * \varepsilon$$

$$D = 1 - \tau * 1 + \tau * 1 - \varepsilon$$

$T_{sens}$  è la temperatura radiometrica al sensore,  $T_a$  è la temperatura

media atmosferica (funzione della temperatura near-ground) mentre  $a$  e  $b$  sono due coefficienti determinati empiricamente per il sensore Landsat. Nel caso in esame  $\tau$  è funzione del contenuto di vapore acqueo e  $\varepsilon$  è funzione dell'indice NDVI tramite la frazione di copertura vegetale (che verrà descritta in seguito).

Le tecniche split-window si basano invece sull'acquisizione simultanea di due o più bande nella finestra spettrale tra gli 8 e i 14  $\mu\text{m}$  e sull'assorbimento differenziale da parte dell'atmosfera (Brivio et al., 2006).

La temperatura viene ricavata come combinazione lineare delle temperature radiometriche determinate nei due canali, sotto l'ipotesi che sia la legge di Planck che la trasmissività dell'atmosfera siano variabili linearmente rispettivamente con la lunghezza d'onda e con il contenuto di vapore acqueo dell'atmosfera, con equazioni del tipo

$$T_s = T_{b1} + a * T_{b1} - T_{b2} + b$$

dove  $T_s$  è la temperatura termodinamica,  $T_{b1}$  e  $T_{b2}$  sono le temperature radiometriche nelle due bande d'acquisizione,  $a$  e  $b$  sono due coefficienti, il primo che rappresenta la dipendenza dal vapore acqueo e dall'emissività della superficie, il secondo quella dalla presenza di  $\text{CO}_2$  e aerosol. E' da notare come con questi metodi venga considerato l'effetto congiunto di emissività della superficie e interazione con l'atmosfera, mentre negli altri metodi descritti i loro effetti vengono modellati separatamente (Brivio et al., 2006).

Oltre ai metodi appena descritti ne esistono molti altri in letteratura per derivare la Land Surface Temperature da immagini satellitari (Bitelli & Conte, 2011a): tra di essi si ricordano il NOR (Kealy & Hook, 1993) lo spectral ratio method (Watson 1992) il TES (Gillespie 1998) o il TISI (Becker & Li, 1990), che forniscono tutti un'immagine di LST alla stessa risoluzione

spaziale delle bande del termico (meno risolta delle bande VNIR).

Qualunque siano il sensore infrarosso, la piattaforma d'acquisizione su cui è installato e l'algoritmo scelto per l'elaborazione, per effettuare misure di temperatura superficiale  $T_s$  è necessario conoscere l'emissività dei pixels; dalla definizione di temperatura radiometrica, la legge di Stefan-Boltzmann applicata a tutto lo spettro elettromagnetico sancisce che

$$\sigma * T_{rad}^4 = \varepsilon * \sigma * T_s^4$$

da cui, eliminando la costante di Stefan-Boltzmann, si ricava

$$T_{rad} = \varepsilon^{1/4} * T_s$$

da cui deriva che la temperatura radiometrica è sempre inferiore della temperatura cinetica superficiale della superficie. A titolo d'esempio, in tab. 2.2. sono riportate le differenze nella temperatura radiometrica rilevata di alcune superfici a diversa emissività che si trovano alla stessa temperatura termodinamica.

Superficie	$\varepsilon$	$\Delta \varepsilon$	$T_s$	$T_{rad}$	$\Delta T$
Corpo nero	1.00	===	300.0	300.0	===
Vegetazione	0.98	-2 %	300.0	298.5	-1.5
Suolo umido	0.95	-5 %	300.0	296.2	-3.8
Suolo asciutto	0.92	-8 %	300.0	293.8	-6.2

*Tab. 2.2 – Differenza tra temperatura radiometrica e temperatura termodinamica per alcune superfici a differente emissività (da Brivio et al., 2006)*

Da notare come l'emissività dipenda oltre che dalla lunghezza d'onda, anche dalla geometria d'osservazione, secondo la relazione

$$\varepsilon(\lambda, \theta, \phi) = \frac{L(\lambda, \theta, \phi)}{M(\lambda, T)}$$



dove L è la radianza rilevata, M è l'emittanza di corpo nero,  $\theta$  è l'angolo off-nadir e  $\phi$  è l'angolo azimutale.

In tab. 2.3: sono riportati alcuni valori di emissività spettrale per alcune superfici naturali riferite alla banda spettrale tra gli 8 e i 14  $\mu\text{m}$ .

<b>Superficie</b>	<b><math>\varepsilon</math></b>	<b>Superficie</b>	<b><math>\varepsilon</math></b>
Acqua limpida	0.98-0.99	Neve asciutta	0.85-0.90
Neve umida	0.98-0.99	Vegetazione secca	0.88-0.94
Vegetazione sana	0.96-0.99	Suolo asciutto	0.92-0.94
Suolo umido	0.95-0.98	Roccia granitica	0.83-0.87
Roccia basaltica	0.92-0.96		
Pelle umana	0.97-0.99		

*Tab. 2.3:- Valori di emissività per alcune superfici naturali nella regione spettrale 8-14  $\mu\text{m}$  (da Brivio et al., 2006)*

Per satelliti a risoluzione media o moderata il pixel ha solitamente copertura mista non omogenea: nelle immagini satellitari la vegetazione e i suoli sono i componenti più diffusi sulla superficie osservata. In alcune applicazioni di remote sensing in area rurale, per tenere conto degli effetti dei pixels misti sono state formulate, tramite analisi di regressione lineare, alcune relazioni empiriche che correlano l'emissività all'indice NDVI (Brivio et al., 2006). Van de Griend & Owe (1993) propongono di calcolare l'emissività come funzione dell'indice NDVI secondo la relazione (valida in regioni semiaride e solo per patches larghi coperti solamente da suolo nudo o vegetazione densa):

$$\varepsilon = 1,0094 + 0,047 * \ln (NDVI)$$

Un altro approccio (Valor & Caselles, 1996) per il calcolo dell'emissività dai valori dell'indice NDVI utilizza come parametro la frazione di copertura vegetale (Carlson & Ripley ,

1997)

$$P_V = \frac{NDVI - NDVI_S}{NDVI_V - NDVI_S}^2$$

dove  $NDVI_V$  e  $NDVI_S$  sono i valori tipici dell'indice per superficie densamente vegetata e suolo nudo. Analogamente vengono derivati i valori  $\varepsilon_V$  e  $\varepsilon_S$  corrispondenti ai valori di emissività caratteristici rispettivamente di aree densamente vegetate e suolo nudo tramite la relazione di Van de Griend & Owe (1993) precedentemente descritta, e si calcola l'emissività di ogni pixel con copertura mista tramite

$$\varepsilon = \varepsilon_V * P_V + \varepsilon_S * 1 - P_V$$

Per parametrizzare le caratteristiche biofisiche dei suoli viene utilizzato in alcuni casi (Lu & Weng, 2006; Small, 2006) il modello VIS (vegetation-impervious-soil), con tre endmembers implementati mediante la normalized spectral mixture analysis (NSMA)(Yang & Liu, 2005). Il metodo prevede che vengano identificati tre endmembers sullo scatter plot, corrispondenti alle tre tipologie principali di copertura al suolo, e che le frazioni dei tre endmembers presenti all'interno di ogni pixel vengano ricavate con il metodo dei minimi quadrati. Con il metodo NSMA si ottengono tre immagini che descrivono l'abbondanza di vegetazione, di superfici impermeabili e di suolo nudo all'interno del pixel. La riflettanza (o l'emittanza) del pixel si ottiene quindi dalla combinazione lineare della riflettanza (o l'emittanza) di ognuno degli endmembers che lo compone (Yang & Liu, 2005)

$$R_B = \sum_{i=1}^N f_i * R_{i,b}$$

dove  $f_i$  rappresenta la frazione dell'endmember  $i$  all'interno del pixel e  $R_{i,b}$  è la rispettiva riflettanza.

Weng (2009) riporta che la mancata conoscenza del valore esatto

di emissività introduce degli errori nel calcolo delle temperature superficiali che, nel caso si utilizzi un single channel method, vanno da 0,2 a 1,2 °K in estate e da 0,8 a 1,4°K in inverno (considerando un valore di emissività di 0,98 ad un'altitudine di 0 m).

Eneva & Coolbaugh (2009) evidenziano l'importanza di effettuare correzioni non solo per l'albedo (o per l'emissività), ma anche per la pendenza topografica e l'inerzia termica (per cui, ad esempio, i versanti sud sono più caldi di quelli a nord) e altri fattori quali l'altimetria e l'inversione termica. Quest'ultimo è un fenomeno meteorologico che si verifica prevalentemente nelle notti invernali con condizioni di vento stabile e consiste in masse d'aria fredda attratte dalla gravità attraverso dei canali preferenziali (chiamati *kadiabatic flow*) sino ai piedi di colline, montagne o altre barriere topografiche (Eneva & Coolbaugh, 2009).

Coolbaugh et al. (2006) effettuano uno studio per l'identificazione di anomalie geotermiche su una zona con albedo alte e bassa inerzia termica mediante immagini ASTER (VNIR e TIR), con correzione per gli effetti di riscaldamento solare, per le variazioni dell'albedo superficiale e per l'effetto della pendenza topografica. Essi identificano tre situazioni per le quali è necessario effettuare questi tipi di correzione per la ricerca di anomalie geotermiche: per analisi su aree estese, in zone con pendenze molto variabili, e per situazioni con evidenti false anomalie.

Un'ulteriore difficoltà nell'utilizzo di immagini satellitari per la misura della temperatura superficiale al suolo consiste nella validazione dei risultati ottenuti, a causa della natura puntuale dei dati di temperatura ottenuti dalle stazioni metereologiche rispetto ai valori areali ottenuti mediante analisi remote-sensed

(Bitelli & Conte, 2011a): la temperatura di brillantezza rilevata è relativa all'intero pixel (come di conseguenza la temperatura superficiale), mentre la T misurata è solitamente puntuale e risente quindi di un'elevata variabilità spaziale. Eneva & Coolbaugh (2009) utilizzano delle termocoppie installate su target a terra con una superficie di 9 mq per controllare l'accuratezza del prodotto AST08 (con pixel di 90 mq): i risultati appaiono altalenanti, e le differenze sono attribuite alla differente superficie interessata dalla misura di temperatura.

### 2.3 Telerilevamento termico satellitare in area urbana

Lo studio di Arnfield (2002) analizza lo stato dell'arte e la produzione scientifica nell'arco di un ventennio, occupandosi in particolare di due aspetti della climatologia urbana:

- i processi correlati alla turbolenza atmosferica e allo scambio di energia ed acqua a differenti scale spaziali;
- le diverse esperienze di letteratura inerenti il campo della temperatura urbana e il fenomeno dell'Urban Heat Island.

Secondo Arnfield l'attenzione degli studiosi col tempo si è spostata da sperimentazioni empiriche e descrittive a simulazioni numeriche basate su modelli, la cui affidabilità dipende però molto dalla precisione e dall'effettiva rappresentatività dei parametri che regolano i differenti processi.

Nella parte iniziale del suo articolo, Arnfield distingue i diversi elementi che compongono il tessuto urbano alle diverse scale spaziali. Il singolo edificio è composto da diverse superfici con differente esposizione temporale alla luce solare, nonché differente ventilazione ed emissività sulle frequenze del TIR. Le superfici orizzontali ground-level sono composte da aree irrigate, prati, superfici impermeabili o non irrigate con proprietà radiative, termodinamiche, aerodinamiche e di umidità differenti. L'Urban Canyon, costituito dallo spazio compreso tra edifici adiacenti, dalle superfici solide che lo delimitano lateralmente e inferiormente e dalle superfici virtuali superiore (al livello delle coperture) e laterali (intersezioni tra strade) viene solitamente descritto da un parametro chiamato aspect ratio

$$AR = H_{edifici}/L_{strada}$$

Con l'aggiunta delle superfici di copertura degli edifici che li delimitano gli Urban Canyons formano i cosiddetti City Blocks, che a loro volta generano i quartieri, le diverse land-use zones e

infine l'intera città.

Anche nell'atmosfera che sovrasta l'area urbana possono essere distinte delle zone, con diversa estensione, interessate da processi di trasferimento di calore ed energia differenti (Arnfield, 2002):

- l'urban canopy layer (UCL) arriva sino al livello delle coperture ed è regolato da processi in microscala;
- il roughness sublayer è lo strato di atmosfera immediatamente sovrastante le superfici uniformi con elementi scabri, nel quale i flussi sono interazioni di scie e pennacchi di umidità, calore ed inquinanti generate dai singoli elementi;
- il surface layer si trova ad un'altezza in cui i flussi turbolenti dipendono solamente dall'altitudine e dal gradiente di temperatura verticale.
- l'urban boundary layer (UBL) arriva più in alto, sino ad alcune volte l'altezza degli edifici, ed è la zona di atmosfera influenzata dalla presenza del tessuto urbano, caratterizzata da processi su mesoscala.

Uno dei parametri principali che descrive le caratteristiche di una città è la rugosità aerodinamica, che si può esprimere tramite le due altezze  $z_0$  e  $z_d$  determinabili empiricamente (Arnfield, 2002) ed è necessaria per la valutazione di tutti i processi che avvengono all'interno dei diversi urban air layers. Qualunque sia la scala su cui si effettua l'analisi dei flussi di energia e materia (edificio, urban canyon, quartiere, intera città), la formula base del modello è (Arnfield, 2002):

$$Q^* = Q_H + Q_E + Q_G$$

dove  $Q^*$  è la radiazione netta,  $Q_H$  e  $Q_E$  sono i flussi turbolenti di calore sensibile e latente e  $Q_G$  è il flusso di calore per conduzione che coinvolge la superficie (entrante o uscente).

Riferendosi ad un volume più grande, esteso dal suolo sino al bordo dell'Urban Canopy Layer, la relazione viene modificata con alcuni termini addizionali:

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

Dove  $Q_F$  rappresenta l'energia di origine antropica rilasciata all'interno del volume,  $\Delta Q_S$  è il calore immagazzinato dai corpi all'interno del volume e  $\Delta Q_A$ , è l'advezione (trasferimento di masse per moti orizzontali) netta attraverso la superficie che lo delimita.

L'energia di origine antropica può essere a sua volta espressa come la combinazione di diversi fattori:

$$Q_F = Q_{Fv} + Q_{Fh} + Q_{Fm}$$

ovvero le porzioni generate rispettivamente da veicoli, sorgenti stazionarie (come gli edifici) e metabolismo umano e animale.

Al variare della scala spaziale, le metodologie e le relazioni matematiche utilizzate per il calcolo dei diversi fattori del bilancio energetico variano.

Per una corretta comprensione dei fenomeni è molto importante correlare gli studi effettuati su scala diversa: i bilanci d'energia alle diverse scale sono differenti, e bisogna perciò considerare le diverse influenze sia in maniera gerarchica che come interazioni alla medesima scala (Arnfield, 2002). Le variazioni diventano meno sensibili man mano che si allarga la scala, e l'unione di diverse scale può essere direttamente nella parametrizzazione dei flussi di calore o negli Energy Budget Models (Arnfield, 2002).

Con l'avvento di sensori satellitari TIR a risoluzione più elevata l'attenzione dei ricercatori si è concentrata anche sull'utilizzo di immagini di temperatura superficiale e sulla correlazione tra le temperature telerilevate e quelle atmosferiche. Inizialmente i satelliti maggiormente utilizzati per questo tipo di analisi sono stati il MODIS, l'AVHRR e l'HCMM, che offrivano una

risoluzione spaziale piuttosto bassa (pixel di dimensione chilometrica); pressoché in quasi tutti i casi analizzati si evidenziava come ci sia un netto legame tra i valori dell'indice NDVI e le temperature minime rilevate (in zone con la stessa altimetria), mentre tra le misure di temperatura superficiale e quelle atmosferiche (Gallo et al., 1994) la correlazione sia piuttosto bassa.

Nell'analisi della correlazione tra temperature superficiali e temperature atmosferiche bisogna considerare anche la variazione di queste ultime con l'altimetria della superficie osservata: il gradiente adiabatico teorico nelle temperature dell'aria è di  $-9,8^{\circ}\text{C}/\text{Km}$ , ma quello osservato in natura è minore (principalmente a causa della presenza di vapore acqueo) e si attesta di solito intorno ai  $6-7^{\circ}\text{C}/\text{Km}$ . Dall'analisi di alcune immagini di LST ASTER Eneva & Coolbaugh (2009) osservano un gradiente di circa  $-5^{\circ}\text{C}/\text{Km}$  nelle immagini notturne ed un gradiente medio di  $-8,4^{\circ}\text{C}/\text{Km}$  in quelle diurne, mentre l'International Civil Aviation Organization (ICAO) suggerisce di utilizzare il gradiente ambientale di temperatura, pari a  $-6,5^{\circ}\text{C}/\text{Km}$  (Kato et al., 2005).

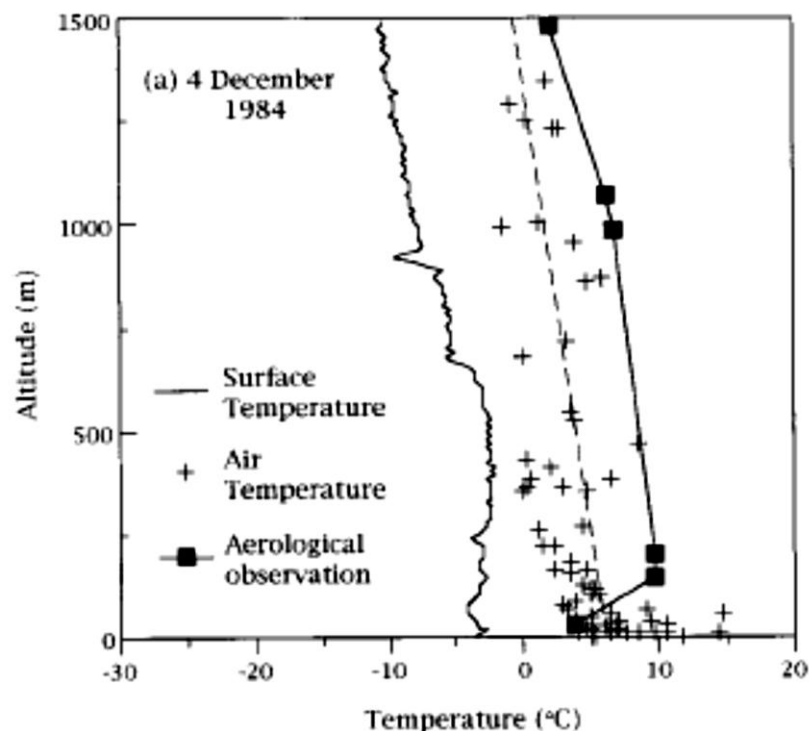
A tal proposito uno studio molto interessante è quello effettuato da Kawashima et al. (2000), che analizza la relazione tra temperatura atmosferica, temperatura superficiale e abbondanza di vegetazione. In esso vengono utilizzate delle immagini Landsat (diurne e notturne) in combinazione con dati da una rete meteorologica di 68 stazioni distribuite intorno all'area di studio e con osservazioni dei parametri atmosferici mediante radiosonde. L'immagine diurna ad alta risoluzione è stata utilizzata, dopo essere stata corretta atmosfericamente mediante codice LOWTRAN, per effettuare una classificazione *max-likelihood* a sei classi (acqua dolce, acqua salata, zona residenziale, zona densamente edificata, foreste e suolo nudo) e per calcolare i



valori dell'indice NDVI. Il valore di temperatura superficiale viene quindi calcolato su quattro immagini notturne precedentemente coregistrate sulla prima utilizzando i seguenti valori di emissività derivati dalla classificazione:

- zona densamente edificata -  $\varepsilon = 0,95$ ;
- zona residenziale -  $\varepsilon = 0,96$ ;
- suolo nudo -  $\varepsilon = 0,95$ ;
- foreste -  $\varepsilon = 0,97$ .

Utilizzando un DEM con maglia di 250 m è stato poi possibile valutare la variazione delle grandezze calcolate con l'altitudine, ed effettuare un confronto tra i risultati. Gli autori evidenziano come su tre delle quattro immagini sia riscontrabile il fenomeno dell'inversione termica sia sulle temperature atmosferiche che su quelle superficiali tele-rilevate, sebbene per le prime esso si manifesti intorno ai 150 m d'altezza mentre sulle seconde esso sia più in alto, intorno ai 300-500m (*fig. 2.1*). Il gradiente di temperatura dell'aria osservato varia da  $-4^{\circ}/\text{Km}$  a  $-8^{\circ}/\text{Km}$ .



*Fig. 2.1 – Variazione delle temperature superficiali, atmosferiche da*

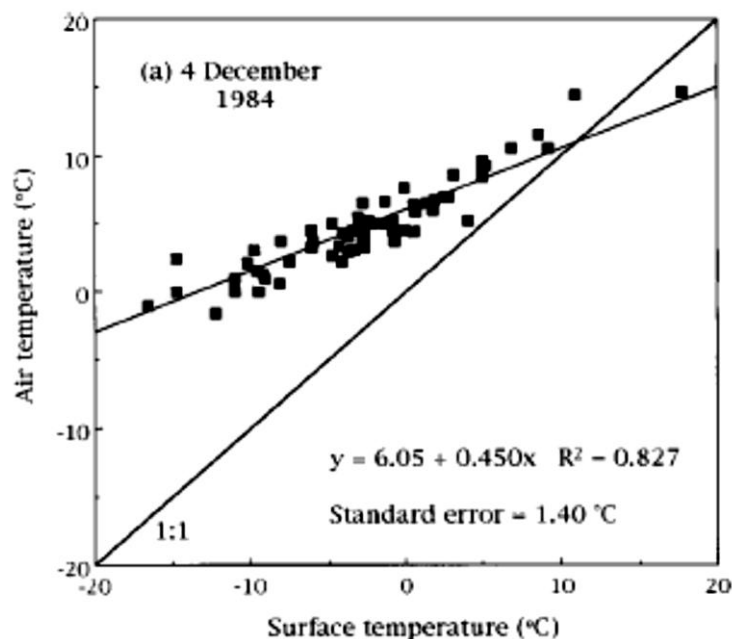
*centralina metereologica e da radiosonda con l'altitudine (da Kawashima et al., 2000)*

Viene successivamente analizzata la relazione tra i valori di temperatura atmosferica e quelli di temperatura superficiale per i pixels corrispondenti alle centraline metereologiche, calcolando le rette di regressione lineare.

Per ognuna delle immagini utilizzate sono stati calcolati, con il metodo dei minimi quadrati, i coefficienti a e b da utilizzare nella relazione

$$T_{atm} = a + b * T_{sup}$$

Si evidenzia come per tutte le date prese in esame si ottenga un coefficiente di correlazione piuttosto elevato (superiore a 0,8), e come la LST mostri un range di variabilità più elevato rispetto alle temperature atmosferiche (*fig. 2.2*).



*Fig. 2.2 – Regressione lineare tra temperatura superficiale e temperatura atmosferica (da Kawashima et al., 2000)*

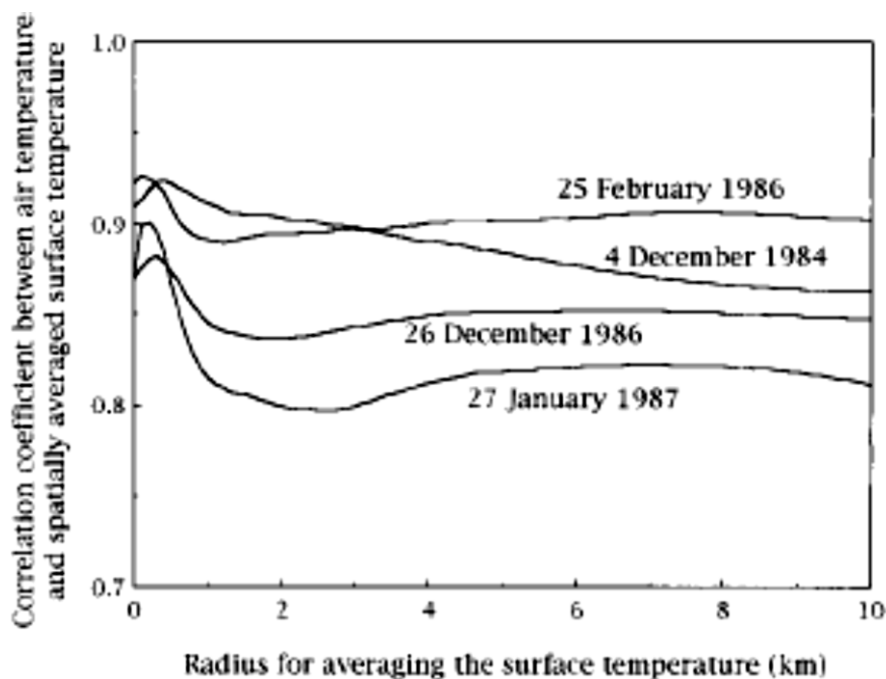
Per valutare l'area d'influenza delle temperature superficiali sulle temperature atmosferiche, gli autori ripetono il calcolo di regressione lineare utilizzando come  $T_{sup}$  la media all'interno di

un cerchio di raggio variabile anziché il valore su un singolo pixel. I risultati mostrano come il coefficiente di correlazione mostri due massimi: il primo, ottenuto con raggi variabili dai 100 ai 400 m, viene attribuito allo scambio di calore tra superficie e atmosfera su microscala mentre il secondo, che si trova per raggi maggiori variabili tra i 6 e gli 8 Km, viene attribuito allo scambio di calore in quota tra le masse d'aria calda e d'aria fredda (*fig. 2.3*).

Infine, gli autori compiono un'analisi a regressione multipla utilizzando come variabile indipendente anche il valore dell'NDVI dei pixels oltre che la temperatura superficiale; il valore della temperatura atmosferica diviene quindi funzione di entrambi i valori secondo la relazione

$$T_{atm} = \alpha + \beta_1 * T_{sup} + \beta_2 * NDVI$$

utilizzando come  $T_{sup}$  quella mediata all'interno del raggio che rendeva massimo il coefficiente di correlazione per le diverse date.



*Fig. 2.3 – Coefficiente di correlazione tra  $T_{atm}$  e  $T_{sup}$  al variare del raggio su cui si calcola quest'ultima (da Kawashima, 2000)*

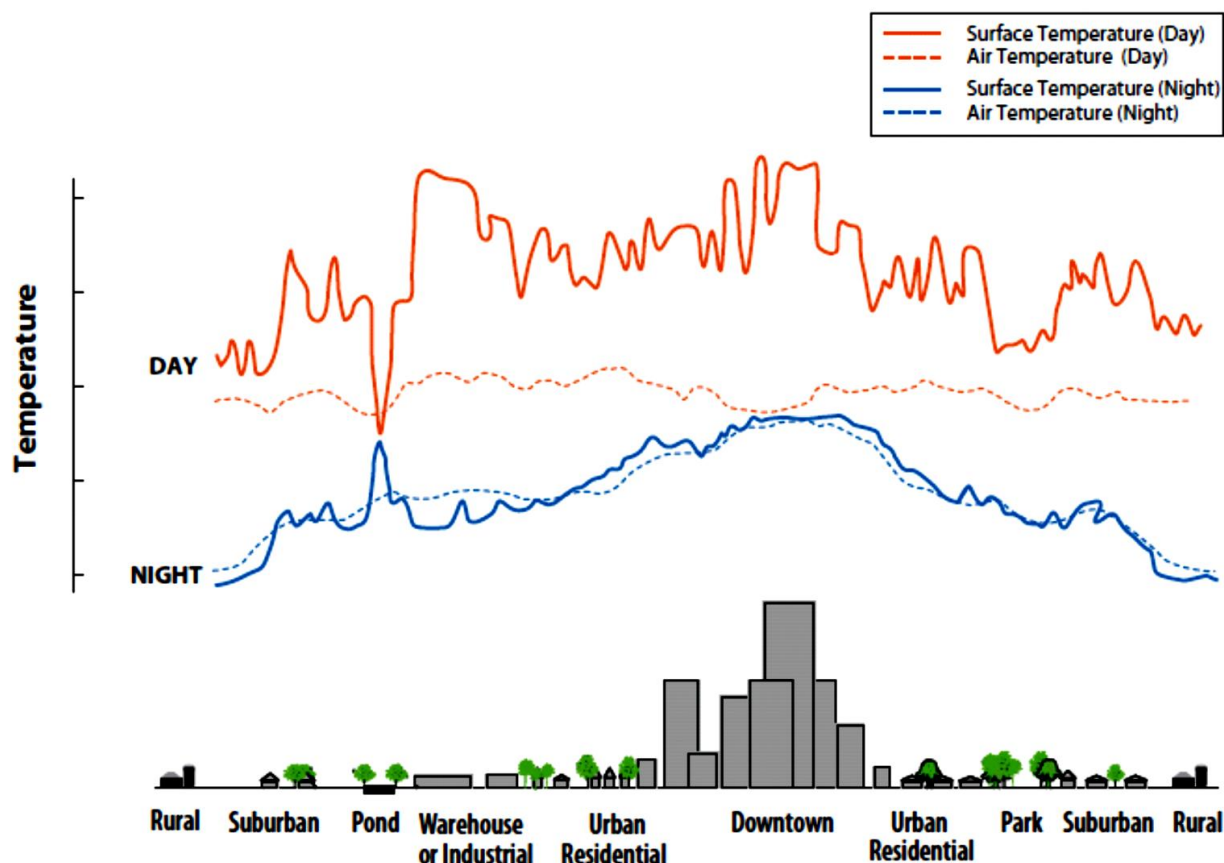
Gli autori concludono che con l'introduzione dell'NDVI i

coefficienti di correlazione sono notevolmente più alti (anche superiori a 0,95), e che la relazione tra indice NDVI e temperatura atmosferica è sempre negativa (all'aumentare del primo diminuisce la seconda); essi inoltre suggeriscono un metodo per la previsione della  $T_{atm}$  da immagini satellitari di Land Surface Temperature che prevede (Kawashima et al., 2000):

- analisi di regressione lineare tra le  $T_{atm}$  misurate in corrispondenza delle centraline atmosferiche e le  $T_{sup}$  al variare del raggio su cui si media la temperatura superficiale;
- la scelta del raggio ideale su cui effettuare la media della  $T_{sup}$  massimizzando il coefficiente di correlazione;
- calcolo dei valori di NDVI da immagini satellitari diurne;
- calcolo dei coefficienti  $\alpha$ ,  $\beta_1$  e  $\beta_2$  mediante multiple regression analysis utilizzando per  $T_{sup}$  il raggio precedentemente calcolato;
- stima della temperatura atmosferica su tutti gli altri pixels dell'immagine dai valori di NDVI e LST mediante la relazione ricavata precedentemente.

## 2.4 Il fenomeno dell'Urban Heat Island

Il fenomeno dell'Urban Heat Island (UHI), noto alla comunità scientifica sin dal 1973 (Oke, 1973), consiste nell'innalzamento della temperatura atmosferica nelle aree urbane rispetto al loro intorno rurale (*fig. 2.4*).



*Fig. 2.4 – Andamento tipico delle temperature atmosferiche e superficiali nel caso di Urban Heat Island (EPA, 2008)*

Il fenomeno dell'UHI appare evidente nelle misure di temperatura atmosferica in aree urbane con popolazione anche minore di 10000 ab., ed in particolare sui valori osservati di temperatura minima (Gallo et al., 1994); esso risulta evidente anche per città di piccole dimensioni. Un primo tentativo di quantificare l'intensità dell'UHI per città con popolazione maggior di 1000

abitanti è proposto da Oke (1973):

$$UHI^{\circ} = 0,73 * \log_{10} POP$$

dove POP è il numero di abitanti della città e  $UHI^{\circ}$  è la differenza di temperatura tra area urbana e rurale in gradi centigradi.

Gli studi effettuati sul fenomeno dell'UHI sono molteplici, e coinvolgono diverse discipline scientifiche (meteorologia, climatologia, remote sensing, medicina, biologia, etc).

Il fenomeno dell'UHI è principalmente dovuto all'attività antropica e ai cambiamenti nell'uso del suolo dovuti all'urbanizzazione quali il consumo d'energia, la presenza di coperture artificiali con alte conduttività termiche, la riduzione dell'evapotraspirazione vegetale (Kato et al., 2005).

Se ci si riferisce alle temperature atmosferiche, l'UHI appare più intensa di notte, con condizioni di cielo sereno e vento calmo, poiché il calore immagazzinato di giorno dalle superfici urbane viene successivamente rilasciato durante la notte.

I fattori principali che concorrono alla formazione dell'UHI sono (EPA, 2008):

- il maggiore assorbimento dell'energia solare in area urbana, dovuto alla ridotta evapotraspirazione rispetto alle aree rurali;
- il maggiore ruscellamento sulle superfici impermeabili che hanno sostituito quelle naturali;
- il calore antropico prodotto da edifici, mezzi di trasporto, metabolismo umano;
- il trasferimento del calore immagazzinato nelle superfici artificiali verso l'atmosfera circostante (per conduzione e convezione);
- la presenza degli urban canyons, con conseguenti riflessioni multiple del calore uscente tra le diverse superfici che li

compongono;

- l'influenza delle strutture urbane su vento e precipitazioni;
- l'emissione di calore da parte di inquinanti e aerosol presenti nell'atmosfera urbana.

Una review dei primi studi sull'UHI è stata svolta da Oke (1982), e si riferisce all'andamento della temperatura in base a osservazioni della T atmosferica. I metodi per valutare gli effetti urbani dell'UHI sono molteplici (Arnfield, 2002):

- tendenze delle temperature atmosferiche su singole stazioni;
- comparazione dei trend su stazioni multiple o coppie di stazioni urbane e rurali;
- reti di stazioni meteorologiche all'interno delle aree urbane;
- sezioni lineari su un'area urbana (transetti);
- differenze delle temperature tra giorni lavorativi e weekend;
- modelli in scala;
- modelli numerici;
- UHI rilevate tramite remote sensing.

Anche se i dati ground-based da stazioni meteorologiche permanenti offrono potenzialmente osservazioni dei parametri atmosferici con un'elevata frequenza e una copertura temporale molto ampia, essi consistono solamente in misure puntuali e quindi mancano della risoluzione spaziale necessaria per una dettagliata comprensione e previsione dei processi termici nell'ambiente urbano. Allo stesso modo le osservazioni basate su termometri installati su veicoli mobili forniscono dati spazialmente distribuiti sulla temperatura atmosferica, ma non consentono di ottenere misure sinottiche e contemporanee su un'intera area urbana (Weng, 2009, Bitelli & Conte, 2011a).

L'avvento dei satelliti multi-spettrali a media risoluzione, con la possibilità di ottenere informazioni nelle lunghezze d'onda nell'infrarosso termico e di ottenere con sufficiente precisione la

temperatura superficiale delle coperture al suolo anche su aree piuttosto estese, fa del telerilevamento uno strumento con notevoli potenzialità nell'analisi dell'UHI: sebbene siano stati effettuati innumerevoli studi al riguardo (Arnfield, 2002) una delle principali difficoltà riscontrate consiste nel correlare la Land Surface Temperature (LST) all'effettivo innalzamento della temperatura atmosferica. A tal proposito alcuni studiosi (Lee, 1993) preferiscono fare riferimento alla Surface Urban Heat Island (SUHI) correlata appunto all'innalzamento delle temperature superficiali nelle aree urbane, considerato un indicatore del corrispondente fenomeno correlato alle temperature atmosferiche.

Arnfield sottolinea che la maggior parte degli studi su UHI sono stati svolti in regioni a clima temperato (ed in particolare su climi mediterranei) e come, probabilmente anche a causa delle metodologie d'analisi diverse, i ricercatori siano giunti a conclusioni in alcuni casi anche contrastanti. Le caratteristiche comuni del fenomeno dell'UHI sembrano essere (Arnfield, 2002):

- l'intensità dell'UHI decresce all'aumentare della velocità del vento e della copertura nuvolosa;
- l'UHI è più marcata per condizioni anticicloniche;
- il fenomeno è più evidente in estate, o nei periodi caldi dell'anno;
- l'UHI tende a crescere con la dimensione della città e con il numero di abitanti;
- il fenomeno è più evidente di notte (almeno nelle osservazioni di temperatura atmosferica) mentre di giorno tende a ridursi o scomparire.

Nel caso di cielo sereno e vento debole molti studi sono riusciti a correlare l'intensità dell'UHI a parametri dipendenti dalla geometria degli UC urbani, come l'AR o lo Sky View Factor, pur



non riuscendo a prevedere la distribuzione spaziale delle temperature.

I vari autori nei loro studi hanno evidenziato alcuni aspetti che caratterizzano il fenomeno dell'Urban Heat island:

- nelle grandi città l'incremento di temperatura atmosferica è accompagnato da un'alta concentrazione di CO<sub>2</sub> e particolato (Price, 1979);
- gli effetti topografici influiscono notevolmente sui valori di temperatura; le superfici con elevazione maggiore sono solitamente più esposte alla radiazione solare e allo scambio di calore per convezione. Di conseguenza, a differenza delle temperature atmosferiche che decrescono con l'elevazione, le temperature superficiali spesso risultano più elevate (Price, 1979);
- l'UHI nelle temperature atmosferiche è più marcata di notte e ad alte latitudini, specialmente in inverno (EPA, 2008);
- le T superficiali sono molto più influenzate rispetto alle T dell'aria dalle caratteristiche in microscala, in particolare dallo sky view factor reduction (Arnfield, 2002);
- la presenza di inquinanti nell'atmosfera urbana, sebbene riduca l'irradiazione solare che giunge alla suolo, causa un incremento della radiazione ad onde lunghe a causa del riscaldamento dovuto all'UHI e all'aumento di emissività dell'atmosfera urbana;
- l'introduzione di materiali urbani e la rimozione della copertura vegetale originaria alterano il bilancio d'energia della superficie, con un aumento del calore sensibile a spese di quello latente (Yang & Liu, 2005);
- mentre l'UHI nelle temperature atmosferiche risulta maggiormente evidente di notte, la SUHI si dimostra più evidente di giorno a causa dell'elevazione degli edifici e

dell'effetto di ombreggiatura sulle zone meno esposte (Arnfield, 2002);

- le temperature superficiali telerilevate mostrano un'anisotropia notevolmente maggiore rispetto alle temperature atmosferiche (Arnfield, 2002).
- mentre per le aree rurali sono state sviluppate tecniche di parametrizzazione abbastanza accurate per descrivere la canopy architecture da dati telerilevati ciò non è altrettanto vero per le aree urbane, dove la morfologia del tessuto influisce grandemente sui flussi di energia e materia (Voogt & Oke, 2003).

Una delle sperimentazioni che combina dati ground-based, aerei e satellitari è stata effettuata da Voogt & Oke sulla città di Vancouver nell'agosto del 1992: si riferisce a T superficiali e dell'aria lungo un transetto che comprende sia l'area rurale che quella urbana. Gli autori sottolineano come la struttura tridimensionale della superficie urbana combinata alla geometria sole-superficie-sensore implica (Voogt & Oke, 2003):

- che la temperatura superficiale, come le altre proprietà fisiche rilevate delle superfici, variano in base all'orientamento relativo e alla posizione delle superfici stesse;
- che l'utilizzo di immagini remote-sensed per descrivere una superficie scabra tridimensionale provoca dei BIAS;
- che si notino delle differenze nelle temperature tra superfici osservate con vista nadirale rispetto ad altre analoghe ma osservate con geometria diversa, anche nel caso di zone residenziali con edifici relativamente bassi e porzioni vegetate ampie;
- che i risultati sono sempre fortemente dipendenti dalla canopy structure;

- che per una misura accurata della temperatura superficiale risulta molto importante anche la precisione nella stima delle emissività direzionale delle diverse superfici;
- nelle immagini notturne le T superficiali delle aree urbane sono più elevate rispetto alle aree naturali, a causa dell'immagazzinamento di calore durante il giorno (Kato et al., 2005);
- d'inverno la quasi totalità del calore sensibile è di origine antropica; il suo contributo nei bilanci energetici appare comunque maggiore nelle aree urbane e industriali (Kato et al., 2005).

## 2.5 Sperimentazione sull'area urbana di Bologna

Questo paragrafo illustra la sperimentazione effettuata sull'area urbana di Bologna mediante immagini multispettrali del sensore ASTER al fine di valutare l'estensione e l'intensità dell'isola di calore urbano sulla città da immagini di Land Surface Temperature.

Sull'area urbana di Bologna sono già stati effettuati alcuni studi finalizzati alla valutazione dell'Urban Heat Island sulla città e delle sue caratteristiche.

Ventura et al. (2009) hanno effettuato un'analisi statistica delle serie storiche di Temperature (dal 1978 al 2008) osservate da due termoigrografi situati rispettivamente nell'area urbana di Bologna e in zona rurale: lo scopo dello studio era dimostrare quanto l'innalzamento delle T sia dovuto a cambiamenti climatici su larga scala invece che a variazioni dell'UHI su piccola scala. Gli autori concludono che le T assolute sono in crescita per entrambe le stazioni, mentre la differenza tra le temperature osservate tra le stazioni rimane costante e pari a circa  $1,3^{\circ}\text{C}$  (quindi l'UHI non subisce variazioni di rilievo).

Un altro studio del fenomeno dell'UHI su Bologna è quello effettuato da Zauli Sajani & Scotto (2007), basato sull'analisi di dati meteorologici di Temperatura e umidità derivati da centraline in area urbana e rurale nell'arco di due mesi (dal luglio al settembre del 2006). Viene evidenziata la necessità di correggere le misure di temperatura atmosferica per gli effetti dell'altimetria: la differenza media tra le temperature minime osservate dalle due stazioni urbane, poste a quota rispettivamente di 2 e di 50 m, risulta di  $2,5^{\circ}$  in condizioni notturne e  $1^{\circ}$  in condizioni diurne. Anche in questo caso l'isola di calore urbano risulta più evidente di notte, con valori che si attestano intorno ai

3 gradi centigradi.

In questa sperimentazione sono state utilizzate due immagini ASTER, acquisite rispettivamente il 22/07/2009 alle ore 10.22.37 UTM e il 25/08/2009 alle ore 10.10.22 UTM. I prodotti utilizzati per l'analisi sono l'ASTER L1B (*Registered Radiance at Sensor*), calibrato radiometricamente e corretto geometricamente, avente sei bande nella regione dell'Infrarosso Termico con risoluzione spaziale di 90m, e l'ASTER07\_XT (*Surface Reflectance*), contenente i valori di riflettanza degli oggetti al suolo (con risoluzione spaziale di 15 metri nelle bande VNIR); per il confronto dei risultati ottenuti è stato inoltre utilizzato il prodotto ASTER\_08 (*Surface Kinetic Temperature*), anch'esso con risoluzione spaziale di 90 m, con i valori di temperatura superficiale calcolati mediante l'algoritmo di separazione Temperatura-emissività TES (Gillespie et al., 1998).

L'approccio utilizzato prevede la stima dell'emissività dei pixels in base ai valori di riflettanza sulle bande del visibile e del vicino infrarosso, seguendo l'algoritmo che correla la stessa ai valori dell'indice Normalized Difference Vegetation Index sotto l'ipotesi che l'emissività effettiva di un pixel sia la somma dei contributi delle diverse superfici che lo compongono (Van et al., 2009).

Nella fattispecie è stato innanzitutto calcolato il valore dell'indice NDVI dai valori di riflettanza delle bande VNIR del prodotto ASTER\_07XT secondo l'equazione

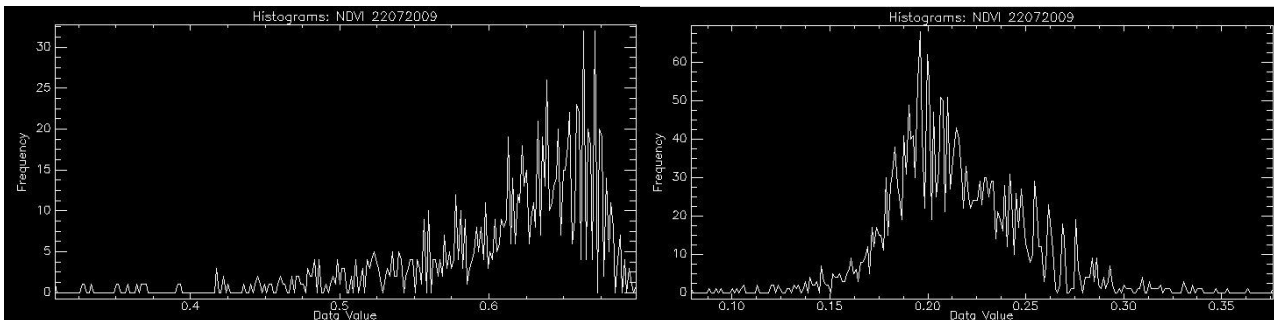
$$NDVI = \frac{b1 - b2}{b1 + b2}$$

dove b1= banda 3 (NIR) e b2 = banda 2 (Red) del prodotto ASTER\_07XT.

Sono stati quindi attribuiti ad ognuna delle due immagini, tramite la definizione di alcune regioni di interesse e l'analisi degli

istogrammi di frequenza dell'indice di vegetazione all'interno delle stesse (*fig. 2.5*), i valori caratteristici  $NDVI_V$  e  $NDVI_S$  per aree rispettivamente densamente vegetate e coperte da suolo nudo; tramite questi ultimi sono stati calcolati i corrispondenti valori di emissività  $\varepsilon_V$  ed  $\varepsilon_S$  secondo la relazione valida su aree ampie e omogenee (Van de Griend & Owe, 1993) già descritta al paragrafo 2.2:

$$\varepsilon = 1.0094 + 0.047 * \ln NDVI$$



*Fig. 2.5 - Iistogrammi di frequenza NDVI 22/07/2009: (a) aree densamente vegetate (b) suolo nudo*

I valori caratteristici di NDVI relativi ad aree totalmente vegetate e coperte da suolo nudo sono risultati rispettivamente di 0,730 e 0,165 per l'immagine del 22/07/2009 e di 0,765 e 0,078 per l'immagine del 25/08/2009; i corrispettivi valori di  $\varepsilon_V$  ed  $\varepsilon_S$  sono risultati di 0,994 e 0,924 per la prima immagine, e di 0,997 e 0,889 per la seconda. I suddetti valori sono apparsi plausibili se confrontati con quelli derivanti da altre analisi simili (Van et al., 2009) e con dati tabellari relativi alle diverse superfici.

La fase successiva è stata il calcolo del *vegetation cover fraction*  $P_V$ , ovvero della frazione di copertura vegetale di ogni pixel dell'immagine; essa è correlata ai valori caratteristici dell'NDVI precedentemente ottenuti dalla relazione (Carlson & Ripley , 1997)

$$P_V = \frac{NDVI - NDVI_S}{NDVI_V - NDVI_S}^2$$

Una volta noto per ogni pixel il valore di  $P_V$ , applicando il modello operativo proposto da Valor & Caselles (1996), è stato possibile attribuire un valore di emissività ad ogni pixel delle due immagini secondo la relazione

$$\varepsilon = \varepsilon_V * P_V + \varepsilon_S * 1 - P_V$$

Avendo assegnato il valore di emissività dei pixels, è stato possibile ricavare il valore della temperatura superficiale degli oggetti a terra dall'inversione della legge di Planck, utilizzando i valori di radianza *Top of Atmosphere* della banda 14 ASTER ( $\lambda=11.318 \mu\text{m}$ ) ottenuti successivamente all'applicazione del metodo di correzione atmosferica *In-Scene Atmospheric Compensation* (Young et al., 2002) ai valori di radianza al sensore del prodotto L1B. Si è deciso di usare la banda 14 per coerenza con la lunghezza spettrale acquisita nella singola banda nell'infrarosso termico del sensore ETM+ (10,4-12,5  $\mu\text{m}$ ).

Si è quindi passati all'analisi dei risultati ottenuti, confrontando per entrambe le immagini i valori di temperatura superficiale precedentemente calcolati con le temperature cinetiche derivate da altre metodologie di calcolo: in particolare è stato utilizzato il prodotto ASTER\_08 (basato sull' algoritmo di separazione temperatura-emissività TES) ed un'altra immagine di  $T_s$ , derivata dai valori di radianza TOA già calcolati mediante l'applicazione dell'algoritmo *Emissivity Normalization* (Kealy & Hook, 1993), considerando un valore dell'emissività costante su tutta l'immagine e pari a 0,96.

Nelle tabelle 2.4 e 2.5 sono riportati i valori statistici delle temperature superficiali ottenute dai 3 diversi approcci, riferite all'intera immagine ASTER processata: si nota come la media della LST calcolata mediante l'algoritmo TES sia in entrambi i casi sensibilmente maggiore rispetto agli altri metodi (in particolare rispetto al metodo basato su un valore di emissività

costante), ed anche il *range* dei valori ottenuti sia più ampio; la deviazione standard risulta massima per l'algoritmo che lega l'emissività all'NDVI, mentre è minima con il metodo dell'*Emissivity Normalization*.

Temp. superficiale (°K) - Immagine ASTER 22/07/2009				
Metodo	Min	Media	Max	Dev. standard
TES	279.0	310.6	334.0	4.7
EN ( $\varepsilon=0,96$ )	285.5	306.5	324.5	3.6
$\varepsilon = \varepsilon(P_V)$	282.3	306.6	326.4	4.9

Tab. 2.4 - Valori statistici della LST sull'immagine del 22/07/2009

Temp. superficiale (°K) - Immagine ASTER 25/08/2009				
Metodo	Min	Media	Max	Dev. standard
TES	282.0	312.9	334.0	5.1
EN ( $\varepsilon=0,96$ )	284.4	306.8	321.7	3.6
$\varepsilon = \varepsilon(P_V)$	285.4	309.2	326.7	6.1

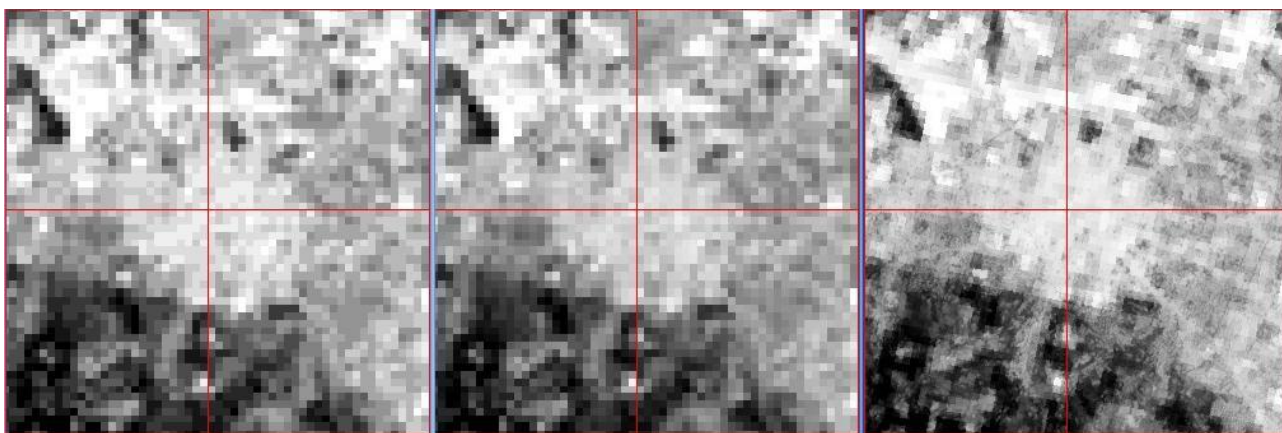
Tab. 2.5 - Valori statistici della LST sull'immagine del 25/08/2009

I valori di  $T_s$  derivati dai tre diversi algoritmi sono notevolmente differenti in termini assoluti, ma l'andamento spaziale degli stessi lungo i transetti considerati appare piuttosto simile; la *surface kinetic temperature* del prodotto ASTER\_08 è sensibilmente maggiore rispetto a quella derivante dall'algoritmo proposto nello studio, e le differenze sono ancor più marcate se confrontata con quella ottenuta dal metodo dell'*Emissivity Normalization*; è altresì importante sottolineare come per la stima del fenomeno dell'UHI sia di certo di maggiore importanza la differenza nelle temperature tra l'area urbana e il suo intorno



rurale piuttosto che i valori assoluti delle stesse.

Le tre immagini relative alla stessa data d'acquisizione sono state successivamente co-registrate geometricamente tramite la funzione *image to image registration* di ENVI, e su ognuna di esse sono stati definiti un transetto orizzontale ed uno verticale (*figg. 2.6 e 2.7*), analizzando quindi l'andamento della Land Surface Temperature lungo di essi per tutti e tre gli algoritmi considerati e confrontando le distribuzioni statistiche sull'intera immagine ottenuta (circa 60 km x 60 km).



*Fig. 2.6 - Temperatura superficiale, subset e transetti 22/07/2009:*

*(a)TES (b)EN (c)  $\varepsilon(P_V)$*

Per l'analisi del fenomeno dell'UHI è stata invece definita una finestra quadrata che contenesse interamente la città di Bologna; è quindi stato effettuato il confronto statistico dei valori di temperatura superficiale derivati dalle tre metodologie, considerando sia l'intera finestra che una regione d'interesse più ristretta, corrispondente al centro storico della città (*fig. 2.10*).

Anche dall'analisi dell'andamento della  $T_s$  lungo i due transetti è possibile notare come la temperatura superficiale dell'ASTER\_08 sia generalmente maggiore, per entrambe le date considerate, sia di quella ottenuta considerando  $\varepsilon$  costante che di quella ottenuta calcolando  $\varepsilon$  in funzione dell'NDVI (*figg. 2.8 e 2.9*); l'andamento della LST lungo i transetti è analogo per tutti e tre gli approcci

utilizzati.

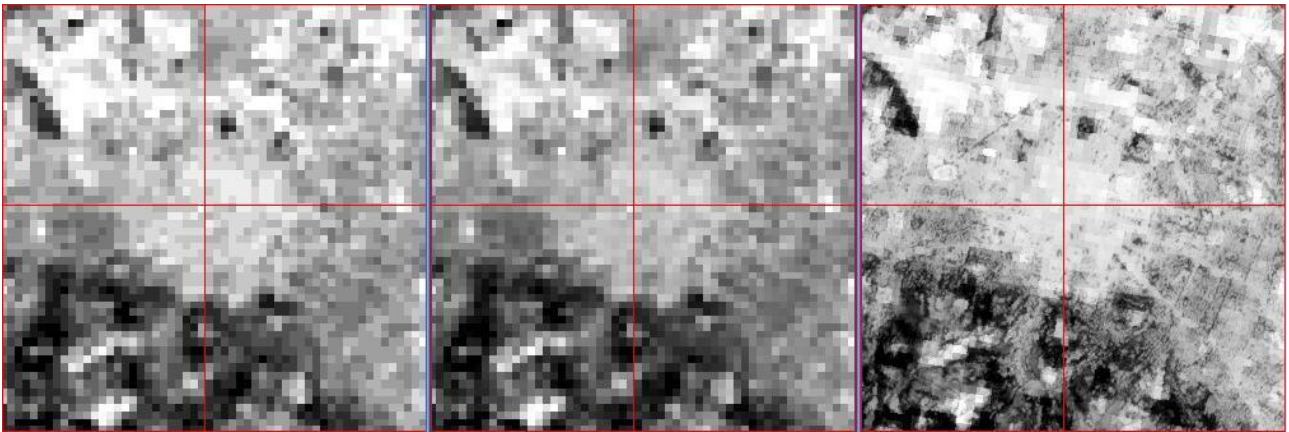


Fig. 2.7 - Temperatura superficiale, subset e transetti 25/08/2009: (a)TES  
(b)EN (c)  $\varepsilon(P_V)$

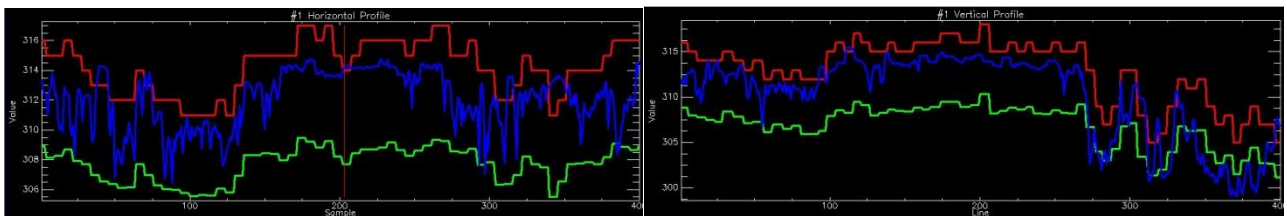


Fig. 2.8 - LST del 22/07/2009 (a)trans. orizzontale (b)trans. verticale  
 $R=TES$   $G=EN$   $B= \varepsilon(P_V)$

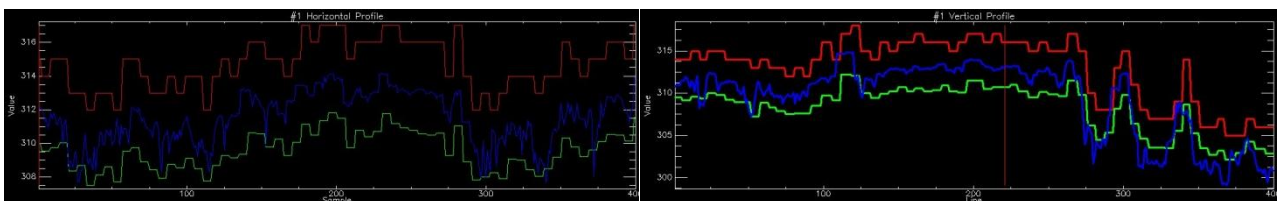
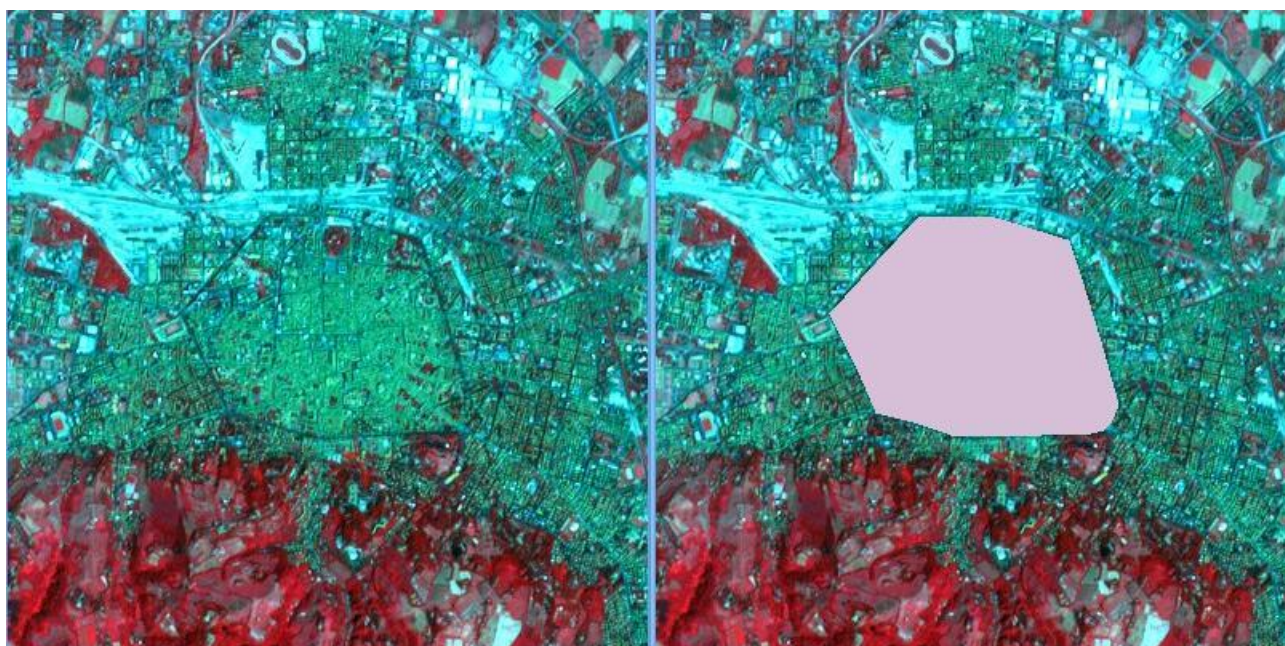


Fig. 2.9 - LST del 25/08/2009 (a)trans. orizzontale (b)trans. verticale  
 $R=TES$   $G=EN$   $B= \varepsilon(P_V)$

Gli istogrammi di frequenza della LST all'interno del centro storico, se confrontati con gli stessi riferiti all'intero subset considerato, evidenziano su entrambe le immagini una differenza rilevante nelle temperature medie; nelle tabelle 2.6 e 2.7 sono riportati i valori statistici ottenuti dai tre criteri adottati per le due date prese in esame, e si nota come la differenza tra il centro storico e l'intero subset oscilla tra  $1,9^\circ$  e  $2,9^\circ$  per l'immagine del 22/07/2009 e tra  $1,1^\circ$  e  $2,4^\circ$  per l'immagine del 25/08/2009; le

differenze di temperatura più marcate derivano dal metodo basato sull'NDVI, seguite dall'algoritmo TES e dall'EN. I risultati ottenuti confermano l'esistenza dell'isola di calore urbano sulla città di Bologna, come già evidenziato da altri studi in materia effettuati sulla stessa area (Ventura et al., 2009, Zauli Sajani, Scotto, 2007).



*Fig. 2.10 – Subset dell'immagine e ROI del centro storico di Bologna*

I valori di temperatura superficiale media calcolati sulle regioni di interesse considerate, nonostante siano notevolmente differenti per i tre diversi approcci utilizzati, evidenziano comunque sensibili differenze tra l'area del centro storico e il suo intorno rurale, le quali dimostrano la presenza dell'isola di calore urbano sulla città di Bologna: la variabilità dei risultati però non consente una stima affidabile della sua intensità che dipende, oltre che dal periodo e dall'ora di acquisizione, dalle condizioni atmosferiche, dall'elevazione del terreno e dalla sua esposizione, dall'accuratezza nella stima dell'emissività e da i diversi altri fattori di difficile modellazione descritti al paragrafo 2.2.

Immagine del 22/07/2009			
LST media (°K)	TES	EN ( $\varepsilon = 0,96$ )	$\varepsilon = \varepsilon (P_V)$
Centro storico	315.1	309.9	311.9
Subset 400x400	312.5	308.0	309.0

*Tab 2.6 – LST media sull'intero subset e sul centro storico (22/07/2009)*

Immagine del 25/08/2009			
LST media	TES	EN ( $\varepsilon = 0,96$ )	$\varepsilon = \varepsilon (P_V)$
Centro storico	314.8	308.1	312.8
Subset 400x400	313.1	307.0	310.4

*Tab 2.7 – LST media sull'intero subset e sul centro storico (25/08/2009)*



### **3. Il Telerilevamento Termico da piattaforma aerea**

#### **3.1 Caratteristiche e campi d'applicazione**

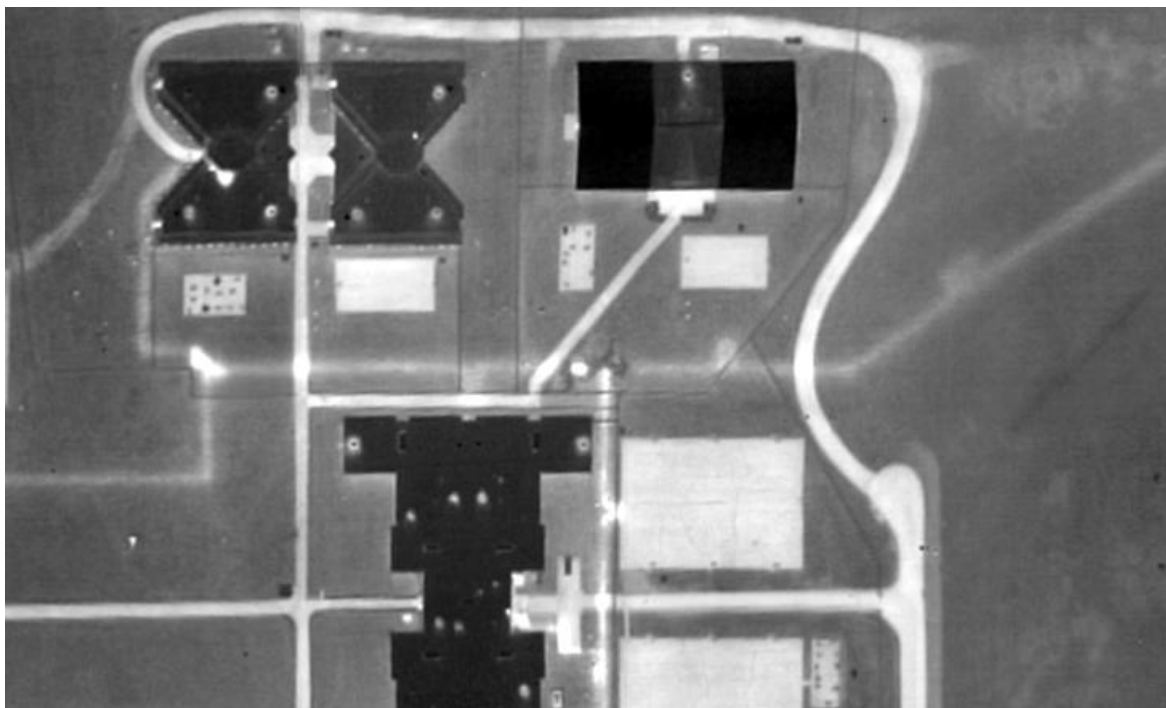
Le applicazioni del thermal remote sensing da piattaforma aerea si dividono in due gruppi (Stockton & Tache, 2006), in base alla necessità di coprire lunghe distanze in un lasso di tempo limitato o di avere una vista nadirale di aree anche molto vaste.

Per queste finalità le termocamere possono essere installate sia su elicotteri che su aerei di piccole dimensioni. Solitamente i primi vengono utilizzati per un numero limitato di target a distanza reciproca ridotta, hanno maggiori costi operativi (a parità di superficie coperta), comportano rilevanti problemi di vibrazioni e oscillazioni e consentono di volare a quota sensibilmente più bassa rispetto a quella necessaria per gli aerei leggeri che, invece, necessitano a parità di risoluzione spaziale al suolo di una risoluzione del sensore notevolmente più elevata (Stockton & Tache, 2006). Sensori più grandi solitamente comportano anche un Field Of View (FOV) più elevato e quindi la necessità di acquisire un numero minore d'immagini per ricoprire la stessa area: in questo modo si può limitare notevolmente la mole di lavoro necessaria per l'elaborazione delle immagini nella creazione dei mosaici. Ad ogni modo, e in particolare per voli notturni, per la georeferenziazione accurata delle immagini è importante conoscere con precisione le posizioni dei centri di presa e l'assetto, ed è perciò assolutamente necessario un ricevitore GPS accoppiato ad un sistema IMU a bordo della piattaforma; esso può essere abbinato anche a un Video Encoder-Decoder (VED) che associa i dati derivati dal ricevitore alle immagini acquisite dalla termocamera (Stockton & Tache, 2006). Per eseguire un rilievo termografico aereo è necessario dunque un velivolo con un'adeguata strumentazione (camera termica,

sistema di navigazione inerziale, ricevitore GPS/GNSS, eventuali corpi neri per la calibrazione della camera), un pilota esperto in questi tipi di operazione (quote di volo e velocità piuttosto basse, possibilità di interferenze con rotte aeree, oscurità) e un operatore capace di utilizzare la strumentazione in condizioni di sicurezza, oltre ad un'accurata e attenta pianificazione delle strisciate, e a condizioni meteo adeguate.

Come già evidenziato, le applicazioni basate sulla termografia aerea sono svariate e coinvolgono diverse discipline. Tra di esse si citano (Stockton & Tache, 2006):

- ispezione di tubature contenenti vapore, acqua calda ad alta temperatura (High Temperature Hot Water, HTHW) e acqua a temperatura media (Medium Temperature Water, MTW), sistemi di teleriscaldamento: la termografia viene usata in analisi qualitative per individuare perdite o altre anomalie termiche, che solitamente appaiono sulle immagini termiche come linee surriscaldate o grandi hotspots. E' da evidenziare come una tubazione interrata a temperatura costante può esibire delle variazioni termiche al passaggio da un materiale di copertura all'altro o al variare della sua profondità (*fig. 3.1*): ovviamente i risultati migliori si ottengono con tubature interrate a bassa profondità e per differenze di temperatura rilevanti.
- geotermia: la termografia aerea permette di identificare delle aree in cui sono evidenti delle anomalie termiche diffuse, che spesso possono essere associate ad attività geotermica. Un esempio di questo tipo di applicazione è l'articolo di Eneva & Coolbaugh (2009), nel quale immagini termiche diurne e notturne del sensore ASTER vengono utilizzate per l'individuazione delle anomalie geotermiche dopo essere state corrette per gli effetti dell'atmosfera, della pendenza



topografica e dell'albedo delle superfici;

- Identificazione e mappatura di siti archeologici o oggetti sepolti;

*Fig. 3.1 – Termografia aerea per l'identificazione di perdite calde da tubazioni interrate*

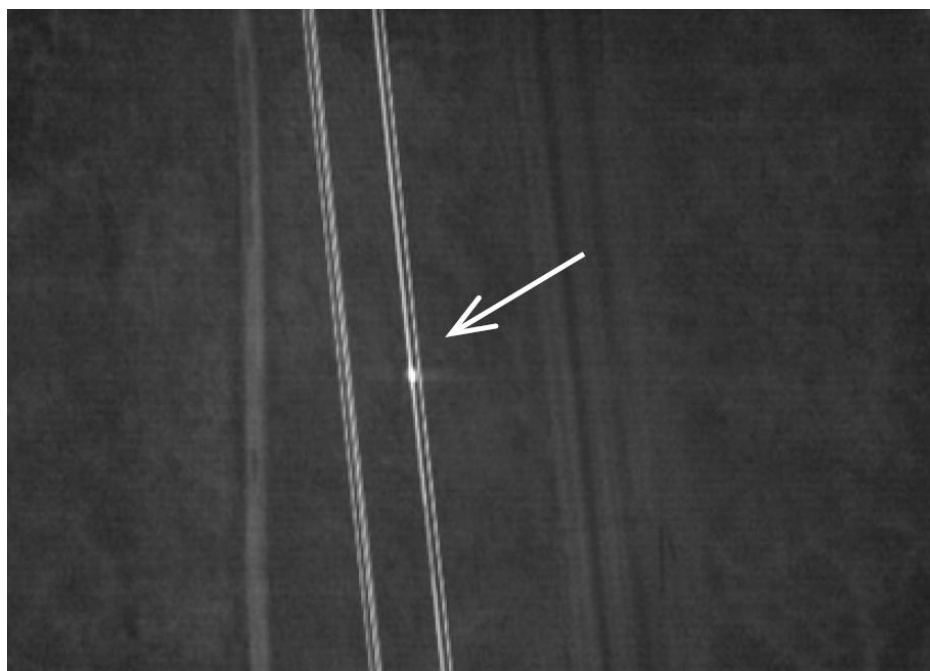
- incendi boschivi: l'individuazione di incendi attivi tramite immagini nel termo-infrarosso è ormai frequentemente utilizzata e si basa sull'elevata quantità di energia termica che viene sprigionata durante la combustione e che viene rilevata dai sensori anche in presenza di fumo denso. A parità di combustibile, l'energia irradiata è proporzionale alla temperatura ed è quindi anche possibile identificare le porzioni più calde di un incendio. Sono stati sviluppati anche algoritmi automatici o semi-automatici che permettono di identificare automaticamente la presenza di un incendio e di allestire risposte all'emergenza adeguate quasi in tempo reale;
- incendi strutturali: in questo caso la termografia aerea è di supporto alle squadre di pronto intervento nel caso di

incendi all'interno di edifici, poiché permette di conoscere le aree più calde dell'edificio stesso e di organizzare le missioni di soccorso;

- incendi sub-superficiali che possono avvenire in corrispondenza di aree adibite a discarica con conseguente rischio ambientale per l'ambiente circostante. In maniera analoga possono essere identificati anche processi di combustione spontanea per depositi di carbone, torba o legname;
- corsi d'acqua e sistemi di drenaggio: il flusso di un liquido (anche all'interno di un'altro liquido a differente temperatura) può essere identificato tramite immagini termiche, permettendo così di individuare scarichi illegali, perdite da impianti fognari, processi di dispersione di inquinanti e di analizzare e monitorare l'acqua di infiltrazione o ruscellamento;
- censimento di animali: alcune specie animali a sangue caldo (come cervi, alci o uccelli migratori) possono essere trovate e conteggiate tramite immagini agli infrarossi;
- ricerca e soccorso (Search and Rescue) in ambienti con condizioni ambientali ostili, o in presenza di fumo o nebbia;
- guasti o malfunzionamenti nelle linee di trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica ad alto voltaggio: in questi casi si sfrutta l'alta temperatura raggiunta dai componenti che possono presentare difetti. La termografia aerea, anche se condotta da brevi distanze, permette sì di identificare anomalie termiche nelle linee (con dimensione dell'ordine di un pollice) ma non ne consente un'accurata misura della temperatura (*fig 3.2*);
- rilievo dello stato e dell'efficienza dell'isolamento nelle coperture edilizie: se ne parlerà più dettagliatamente nel



seguito della tesi.



*Fig 3.2 – Monitoraggio di reti elettriche tramite termografia aerea  
(Stockton & Tache, 2006)*

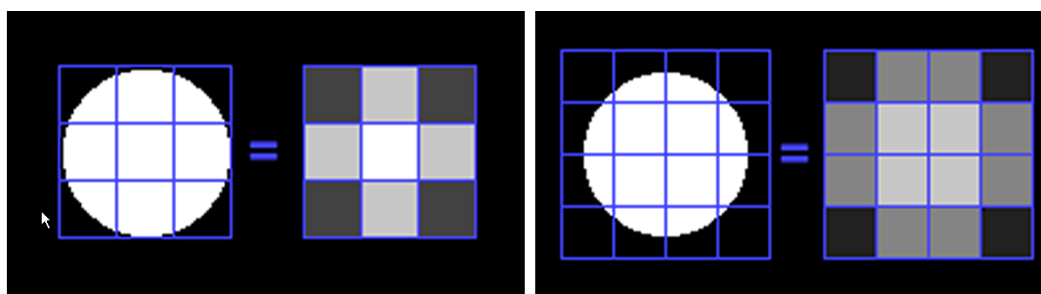
In particolare, il manuale ASHRAE (1993) identifica la termografia aerea come un efficace strumento per l'analisi d'infiltrazioni d'umidità all'interno dell'isolamento delle coperture edilizie, specialmente con rilievi infrarossi ripetuti che consentono di monitorare le condizioni delle coperture per tetti piani o con pendenza moderata durante tutto il loro periodo d'esercizio. Difetti nell'isolamento comportano infiltrazioni d'acqua, che vengono poi evidenziate nelle immagini termiche notturne come aree più calde a causa del maggiore calore latente immagazzinato nell'acqua contenuta nella struttura dopo l'irradiazione solare diurna. La termografia aerea in questo caso risulta notevolmente più conveniente rispetto a quella terrestre, perché oltre ad offrire una larga copertura presenta minori problemi prospettici e di riflessione dagli oggetti circostanti, non necessita di operatori che siano fisicamente sul tetto e può essere facilmente utilizzata in combinazione con software di Computer Aided Design & Drafting (CADD) per la mappatura delle aree

potenzialmente affette da contaminazione d'acqua (Stockton & Tache, 2006).

Alcuni esperimenti hanno dimostrato che i sensori termici aerei operanti nel MWIR producono delle immagini nelle quali gli oggetti caldi al suolo sono maggiormente riconoscibili rispetto alle immagini prodotte da sensori che operano nel LWIR (Stockton & Tache, 2006).

Uno dei limiti principali nelle analisi quantitative della temperatura da piattaforma aerea (o satellitare in generale) consiste nella superficie limitata su cui si riescono ad ottenere misure affidabili: anche con sensori ad alta risoluzione e utilizzando lenti adeguate (teleobiettivi), le vibrazioni indotte dal mezzo aereo provocano effetti di image “shaking” e image “smearing” molto complessi da correggere, il che impedisce di fatto la misura della temperatura di oggetti al suolo con dimensione nell'immagine inferiore a 3x3 pixels.

Per il teorema della frequenza di Nyquist infatti oggetti al suolo che abbiano dimensione minore a due volte l'IFOV (Instantaneous Field of View) non possono essere risolti da sensori CCD (*fig. 3.3*), e per ottenere delle misure affidabili della temperatura superficiale di un corpo è necessario che esso copra almeno una finestra della dimensione di 3x3 pixels (Stockton & Tache, 2006).



*Fig 3.3 – Conseguenza del teorema di Nyquist*

Le condizioni ideali per effettuare un rilievo termico notturno finalizzato alla misura della temperatura delle superfici al suolo sono le seguenti (Allison, 2007):

- rilievo almeno quattro ore dopo il tramonto (per limitare gli effetti dell'irradiazione solare diurna);
- cielo sereno e assenza di precipitazioni;
- velocità del vento basse (per una maggiore stabilità dell'aeromobile e per limitare lo scambio di calore per convezione);
- coperture asciutte e assenza di rugiada (per evitare perdite di calore per evaporazione);
- buona visibilità;
- temperatura dell'aria al suolo piuttosto bassa (in modo da massimizzare le differenze in-out).

Di notevole importanza risulta anche il tipo di sensore utilizzato e le sue caratteristiche: tra di esse, la risoluzione spaziale del sensore appare la più rilevante, in quanto a parità di risoluzione a terra un sensore con un numero elevato di pixels permette di coprire la stessa area con un numero limitato di strisciate, abbattendo i costi di rilievo (valutati nell'ordine di circa 1000 USD per una strisciata di 35 Km secondo Hay et al., 2011) e limitando notevolmente i problemi di mosaicking dovuti a variazioni nelle condizioni atmosferiche durante i rilievi.

### 3.2 Il modello di correzione interna delle termocamere

Le camere termiche che solitamente sono impiegate per i rilievi aerei sono state sviluppate per utilizzi tipicamente terrestri (come l'analisi dello stato d'isolamento degli edifici) e quindi presentano una serie di caratteristiche di cui bisogna tenere conto nel loro utilizzo per applicazioni diverse da quelle per cui sono state progettate.

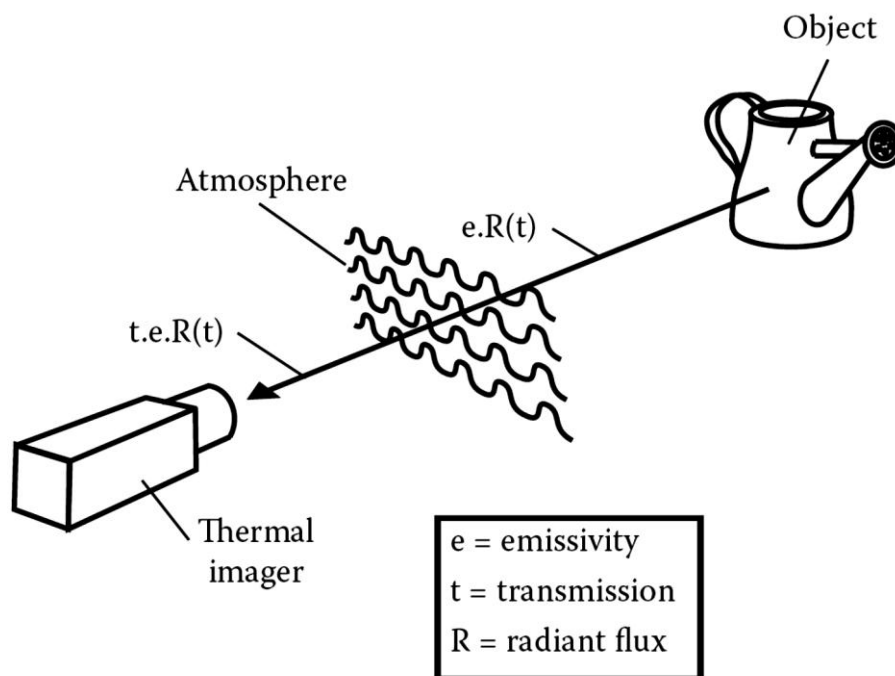
Nella maggior parte dei casi i sensori infrarossi commerciali offrono la possibilità di selezionare, in base allo scopo d'utilizzo, in quale range di temperatura si trovano ad operare (es.  $-40 - +60^{\circ}\text{C}$  o  $0-500^{\circ}\text{C}$ ); solitamente l'intervallo più freddo si utilizza per applicazioni nel campo dell'edilizia, mentre per il monitoraggio di impianti industriali è necessario coprire dei range di temperatura notevolmente più elevati.

Per tenere conto dell'effetto dell'emissività e dell'influenza dell'ambiente circostante nella misura della temperatura di un corpo, le camere termiche terrestri utilizzano un algoritmo di correzione interno che permette, una volta impostati i parametri di input, di trasformare i valori di radianza rilevata in misure di temperatura apparente dei corpi presenti sulla scena.

Il modello tipo alla base di quest'algoritmo di correzione considera che la radianza che incide sul sensore proveniente da un corpo con emissività  $\varepsilon$  è composta da tre componenti:

- la radianza emessa dall'oggetto che raggiunge il sensore dopo essere stata attenuata dall'atmosfera (*fig. 3.4*);
- la radianza emessa dall'ambiente circostante che viene riflessa dall'oggetto (secondo la sua riflettività  $1 - \varepsilon$ ) e raggiunge il sensore anch'essa dopo aver interagito con l'atmosfera nel percorso oggetto-sensore;
- l'eventuale contributo della radiazione solare riflessa

dall'oggetto, anch'essa secondo il valore di riflettività di quest'ultimo (solo per sensori nella regione del MWIR, dove la radiazione solare ha un contributo non trascurabile).



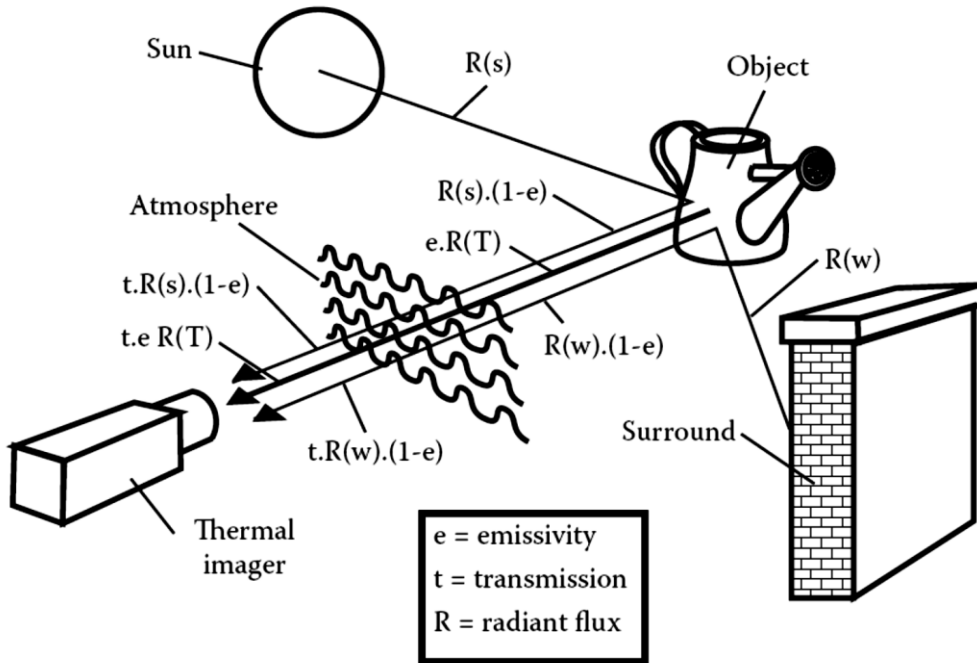
*Fig. 3.4- Radianza proveniente dall'oggetto (da Williams, 2009)*

Il modello di correzione completo è riportato in fig. 3.5: i parametri necessari per la correzione dell'immagine sono l'emissività, la temperatura riflessa, la distanza di presa e l'umidità relativa dell'aria.

E' da notare come in questo caso, considerando le brevi distanze in gioco nella termografia terrestre (solitamente inferiori a 50 m), venga trascurato il contributo dovuto all'emissione dell'atmosfera stessa nelle bande dell'Infrarosso; in realtà nel caso di termografia aerea il la radianza emessa dall'atmosfera stessa non è trascurabile e bisogna tenerne conto nella correzione delle immagini acquisite (Bitelli & Conte, 2011b).

Per analisi quantitative della temperatura superficiale più accurate, o nel caso di rilievi effettuati con distanze di presa maggiori, è opportuno disattivare la correzione atmosferica interna e considerare un modello radiativo fisico che tenga conto,

oltre che di altri parametri atmosferici come la concentrazione di particolato e altri fattori, anche della radiazione infrarossa emessa dall'atmosfera stessa.



*Fig. 3.5 – Schematizzazione del modello di correzione interna della termocamera (da Williams, 2009)*

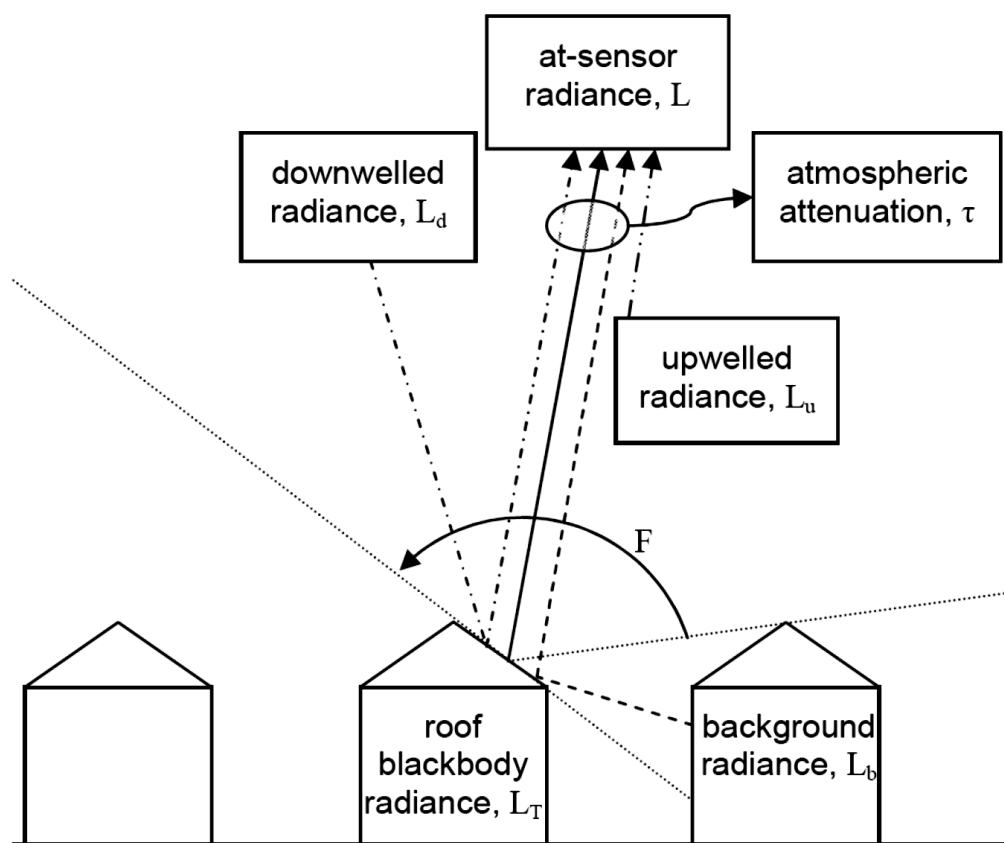
### **3.3 L'influenza dell'atmosfera sulle immagini termiche aeree**

Come già descritto nel cap. 1, le molecole dell'atmosfera interagiscono con la radiazione mediante i fenomeni di assorbimento e diffusione. Nelle lunghezze d'onda coperte dalle frequenze dell'Infrarosso sono presenti diversi picchi d'assorbimento corrispondenti alla presenza di diversi componenti dell'atmosfera (principalmente vapore acqueo, biossido di carbonio, ozono e monossido di carbonio); in corrispondenza di questi picchi d'assorbimento l'influenza dell'atmosfera rende impossibile la rilevazione della radiazione emessa da parte dei sensori infrarossi (a meno di acquisizioni a distanze molto brevi).

I sensori operanti nell'Infrarosso solitamente acquisiscono nelle regioni delle Medium Wave Infrared (MWIR, 3-5  $\mu\text{m}$ ) o delle Long Wave Infrared (LWIR, 8-14  $\mu\text{m}$ ), corrispondenti alle finestre atmosferiche nelle quali la trasmissività dell'atmosfera terrestre è più elevata (Allison, 2007); picchi di assorbimento sono invece riscontrabili nella regione tra i 5 e gli 8  $\mu\text{m}$  (a causa della presenza di vapore acqueo) e anche per lunghezze d'onda inferiori ai 3  $\mu\text{m}$  (frequenza di assorbimento del  $\text{CO}_2$ ).

In generale, la radianza che raggiunge il sensore è composta dalla radianza emessa dai target al suolo (caratterizzati da emissività  $\epsilon$ ), dalla radianza proveniente dai corpi adiacenti che viene riflessa dalla superficie, dalla radianza proveniente dall'arco celeste (riflessa anch'essa), e dalla radianza emessa dall'atmosfera nel percorso target-sensore (Bitelli & Conte, 2011b). Inoltre, una parte di queste radiazioni viene assorbita dalla colonna d'atmosfera compresa tra il target e il sensore, che presenta trasmissività generalmente diversa dall'unità.

Per il calcolo della temperatura superficiale è quindi necessario calcolare tutti i fattori radiativi e correggere i valori di radianza al sensore, derivando la radianza emessa dalla superficie indagata: le immagini termiche vanno quindi processate secondo il modello illustrato in fig. 3.6.



*Fig. 3.6 – Schema del sensor model (da Allison, 2007)*

Sono diversi i parametri atmosferici necessari per lo sviluppo e l'applicazione del sensor model: di primaria importanza risulta il calcolo dei valori della trasmittività dell'atmosfera nel percorso superficie-sensore e delle upwelled e downwelled radiances all'epoca dell'acquisizione aerea. Questi parametri vengono derivati tramite relazioni empiriche o tramite modelli fisici rigorosi, che forniscono il valore di tutti i flussi radiativi una volta inserite come dati di input alcune caratteristiche dell'atmosfera quali la sua temperatura, l'umidità relativa, la concentrazione di determinati inquinanti o composti.



La trasmissività indica in forma adimensionale il rapporto tra la quantità di energia che raggiunge il sensore rispetto a quella originariamente generata da un target, che lo raggiungerebbe in assenza di atmosfera; anche in questo caso ci si riferisce al valore nella banda spettrale coperta dal sensore termico. Per valutare direttamente l'effetto della trasmissività dell'atmosfera è possibile calibrare la camera utilizzando un corpo nero a temperatura nota variando progressivamente la distanza di presa: è da evidenziare come la variazione della temperatura apparente con la distanza segua una relazione non lineare del tipo (Williams, 2009)

$$T_m = T_a * \exp(-k * D)$$

dove  $T_m$  è la temperatura misurata,  $T_a$  è la temperatura reale,  $D$  è la distanza e  $k$  è una costante che dipende dalle condizioni atmosferiche all'istante della misura (e viene calcolata dalla termocamera in funzione del valore di temperatura ambiente e dell'umidità relativa).

Per il calcolo della trasmissività alcuni autori hanno proposto relazioni empiriche in cui essa è funzione del vapore d'acqua contenuto in atmosfera. In seguito l'attenzione dei ricercatori si è concentrata sull'uso di modelli fisici rigorosi, quali il LOWTRAN e il più recente MODTRAN, che gode di una maggiore risoluzione spettrale e di migliore accuratezza nei risultati; è stato dimostrato (Williams, 2009) come con questi modelli rigorosi si riesca a produrre mappe di temperatura con errori nell'ordine di 0,7 °C.

La upwelling radiance è la radianza emessa dell'atmosfera che si dirige verso l'alto, raggiungendo il sensore; essa dipende dalla temperatura dell'atmosfera stessa, e naturalmente si riferisce alla banda spettrale acquisita dal sensore.

La radianza totale (su tutto lo spettro elettromagnetico) emessa

da un corpo nero a temperatura T che raggiungerebbe il sensore senza l'intervento dell'atmosfera è calcolabile dall'integrazione della legge di Planck:

$$L(0) = \int_0^{\infty} \frac{2 * h * c^2}{\lambda^5} * \frac{1}{\exp \frac{h * c}{\lambda * k * T} - 1} d\lambda$$

La radiazione che effettivamente raggiunge il sensore termico, che viene calcolata dal MODTRAN, può essere approssimata dalla relazione seguente, che trascura la radianza riflessa dall'oggetto (Allison, 2007):

$$L(h) = \int_0^{\infty} \varepsilon_{\lambda} L_{T\lambda} * \tau_{\lambda}(h) + L_{u\lambda}(h) d\lambda$$

Si può ricavare una relazione lineare tra queste due radianze, ottenendo una relazione del tipo

$$L h = \tau_{\lambda} h * L 0 + L_u(h)$$

rappresentata graficamente in fig. 3.7: la upwelling radiance rappresenta l'intercetta della retta mentre il gradiente corrisponde alla trasmissione atmosferica.

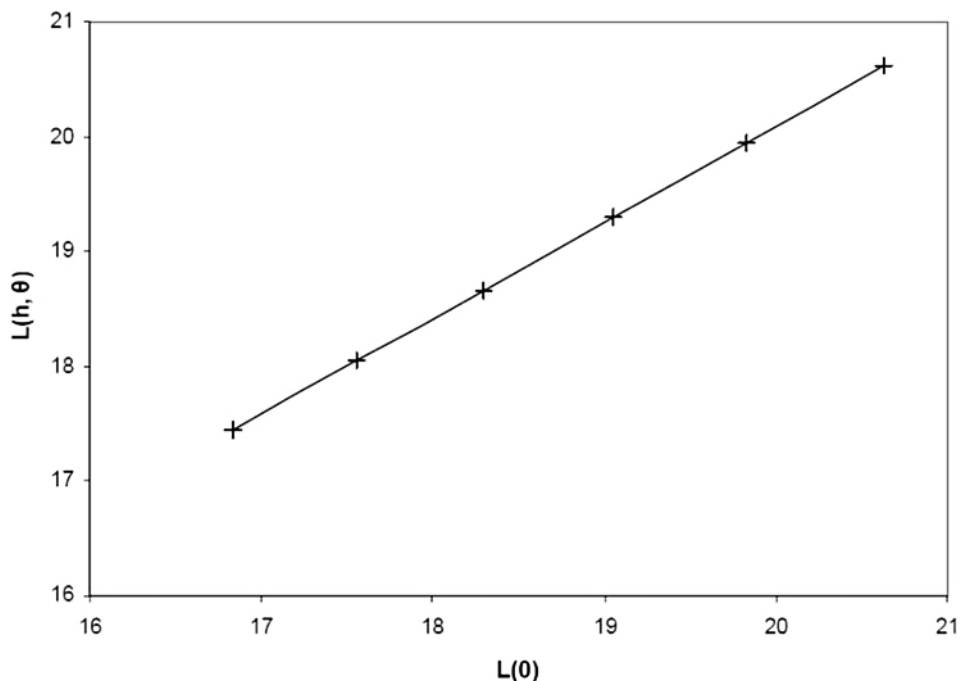


Fig. 3.7 – Relazione tra la radianza teorica al sensore in assenza di

*atmosfera e quella che effettivamente lo raggiunge (Allison, 2007)*

E' da notare come per il calcolo della upwelling radiance tramite modelli fisici rigorosi il sensore venga modellato nello spazio, ad un'altezza pari alla quota di volo, e la radianza che viene calcolata quindi è quella emessa solo dallo strato di atmosfera compreso tra la superficie e il sensore, e non da tutta l'atmosfera nel suo insieme.

La downwelling radiance rappresenta invece la radianza emessa dall'intera volta celeste (nelle bande spettrali coperte dal sensore) che viene riflessa dagli oggetti al suolo e incide sulla superficie del sensore dopo aver attraversato l'atmosfera: naturalmente la sua influenza sulla radianza rilevata è proporzionale alla riflettività del target, che risulta tanto maggiore quanto più bassa ne è l'emissività.

In analogia a quanto avviene con la misura della temperatura riflessa (nel caso di target lambertiani orizzontali rivolti verso la volta celeste) utilizzata come parametro per il modello di correzione interno delle termocamere terrestri, essa è rappresentabile tramite un valore di temperatura (la spectral sky temperature) che corrisponde alla temperatura di corpo nero equivalente dell'atmosfera.

E' importante non confondere la spectral sky temperature con la broadband sky temperature, anch'essa corrispondente alla temperatura di corpo nero equivalente dell'atmosfera, ma riferita a tutto lo spettro elettromagnetico; quest'ultima viene utilizzata con frequenza nella definizione dei modelli energetici che regolano lo scambio di calore per irraggiamento della superficie (Allison, 2007). La sky spectral temperature nel LWIR risulta minore della broadband sky temperature, in quanto l'atmosfera assorbe minor radiazione nelle lunghezze d'onda tra gli 8 e i 14  $\mu\text{m}$ , e di conseguenza emette meno.

Per la derivazione della sky broadband temperature gli studiosi hanno proposto diverse relazioni matematiche (alcune delle quali verranno descritte nel seguito), mentre hanno concentrato minore attenzione sul calcolo della downwelling radiance, probabilmente perché il suo valore è strettamente legato alle bande spettrali di acquisizione del sensore e sarebbe quindi necessario un calcolo ad hoc in base al tipo di termocamera utilizzata. Per il calcolo accurato della downwelling radiance è quindi opportuno utilizzare dei modelli fisici rigorosi (Allison, 2007): si modella un sensore al suolo ( $h=0$ ) rivolto verso lo spazio, e si calcola la downwelling radiance  $L_d(\phi, \theta)$  al variare dell'angolo zenitale  $\theta$  e dell'angolo azimutale  $\phi$ , integrando poi i risultati su tutto l'emisfero celeste come descritto dall'equazione seguente (assumendo variazioni azimutali nulle):

$$L_d = 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} L_d(\theta, \phi) * \cos\theta * \sin\theta d\theta$$

dove  $L_d$  è espressa in  $W * m^{-2} * sr^{-1}$ .

Per il calcolo della  $T_{sky}$  (broadband sky temperature) sono invece state definite relazioni empiriche, solitamente basate su caratteristiche dell'atmosfera quali la temperatura dell'aria e il contenuto di vapore acqueo, e valide in condizioni di cielo sereno; esse sono di tipo analogo alla formula di Swinbank:

$$T_{sky} = (-3,014 * 10^9 + 1,195 * T_{air}^4)^{1/4}$$

$$T_{sky} = 0,05532 * T_{air}^{1,5}$$

Altri autori hanno invece preferito calcolare preventivamente l'irradianza della volta celeste e poi derivare la  $T_{sky}$  sulla base della legge di Stephan Boltzmann, come descritto dalle equazioni seguenti (Allison, 2007):

$$E_{sky} = 1 - \exp(-D * \tau) * \sigma * T_{air}^4$$

$$\tau = \alpha + \beta * \frac{T_{air}}{T_*} + \gamma * \frac{\omega}{\omega_*}$$

$$T_{sky} = \frac{E_{sky}}{\sigma}^{1/4}$$

in cui  $E_{sky}$  è l'irradianza celeste totale ( $W/m^2$ ),  $\sigma$  è la costante di Stephan-Boltzmann ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ ),  $T_{air}$  è la temperatura dell'aria,  $\tau$  è la "graybody optical thickness",  $\omega$  è il contenuto di vapore acqueo ( $Kg/m^2$ ) e  $D, T_*, \omega_*, \alpha, \beta, \gamma$  sono delle costanti.

Naturalmente è possibile derivare  $E_{sky}$  anche dall'applicazione di modelli fisici radiativi, calcolando la radianza del cielo in maniera del tutto analoga a quanto fatto per la downwelling radiance, con le differenze che essa è espressa non più come radianza ma come potenza emessa (si aggiunge perciò un fattore moltiplicativo  $\pi$ ), e che si riferisce a tutto lo spettro elettromagnetico e non solo alla banda spettrale su cui opera il sensore termico. In questo caso si può scrivere quindi:

$$E_{sky} = 2\pi \int_0^{\frac{\pi}{2}} L_{\theta, \phi} \cos\theta \sin\theta d\theta$$

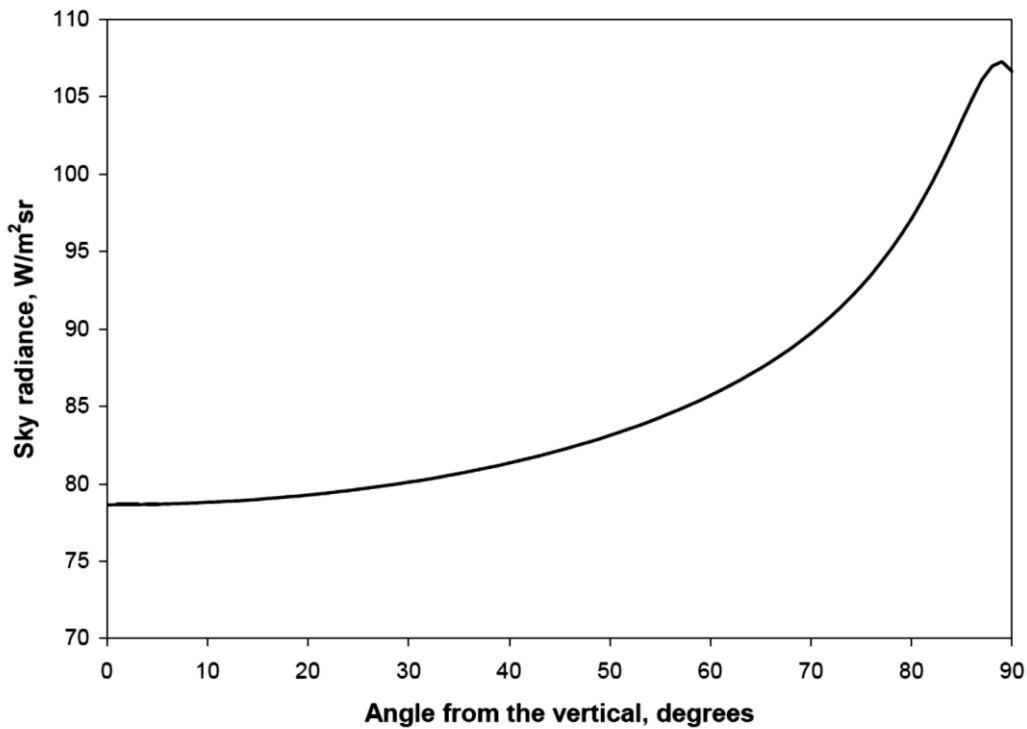
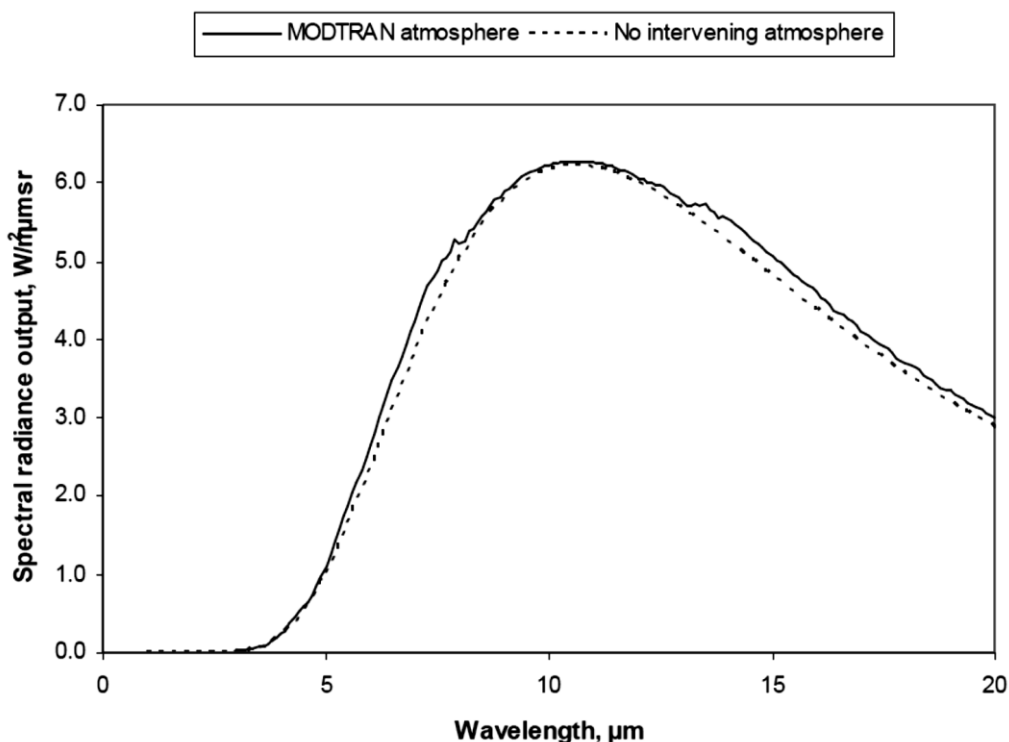


Fig. 3.8 – Irradianza celeste al variar dell'angolo off-nadir (da Allison, 2007)

Si può notare come la radianza direzionale celeste abbia delle variazioni rilevanti al variare dell'angolo off-nadir, in quanto all'aumentare di quest'angolo aumenta lo spessore di atmosfera che contribuisce alla sua emissione; l'andamento tipico di  $E_{sky}$  al variare dell'inclinazione dalla verticale è illustrato in fig. 3.8.

Per una modellazione accurata degli effetti atmosferici sulle immagini è necessario descrivere la variazione dei parametri atmosferici di input con l'altitudine (Bitelli & Conte, 2011b); i profili atmosferici possono essere ricavati dalle osservazioni di radiosonde (che misurano temperatura, pressione e umidità) o rawinsonde (che misurano anche velocità e direzione del vento).



*Fig. 3.9 – Radianza spettrale al sensore con e senza gli effetti dell'atmosfera (da Allison, 2007)*

In fig. 3.9, a titolo d'esempio, è mostrato l'effetto di un'atmosfera tipo sulla radianza spettrale di un target a  $273,15^\circ\text{K}$  per un sensore situato a 760 m d'altezza; si può notare come la radianza che raggiunge il sensore in questo caso specifico sia maggiore di quella emessa dal target, a causa in questo caso del

contributo dell'upwelling radiance.

La radianza di corpo nero del tetto (o di qualsiasi superficie al suolo) è definita come la radianza equivalente emessa da un corpo nero alla stessa temperatura del tetto e può essere ricavata considerando il sensor model descritto dall'equazione seguente ipotizzando che i termini dipendenti dalla lunghezza d'onda siano costanti all'interno della banda spettrale del sensore (Allison, 2007):

$$L = \varepsilon * L_T + 1 - \varepsilon * F * L_d + 1 - F * L_b * \tau + L_u$$

dove L è la radianza al sensore ( $W * m^{-2} * sr^{-1}$ ),  $L_T$  è la roof blackbody radiance ( $W * m^{-2} * sr^{-1}$ ),  $L_d$  è la radianza atmosferica downwelling ( $W * m^{-2} * sr^{-1}$ ),  $L_u$  è la radianza atmosferica upwelling ( $W * m^{-2} * sr^{-1}$ ),  $L_b$  è la radianza media dello sfondo ( $W * m^{-2} * sr^{-1}$ ),  $\varepsilon$  è l'emissività della superficie,  $\tau$  è la trasmittività dell'atmosfera e F è lo Sky View Factor della copertura.

Assumendo che la radianza di fondo (parametro molto complesso da valutare quantitativamente) sia uguale alla blackbody radiance del tetto, l'equazione precedente può essere risolta:

$$L_T = \frac{(L - L_u) \tau - 1 - \varepsilon * F * L_d}{\varepsilon + 1 - \varepsilon * (1 - F)}$$

La radianza di background è difficile da stimare e dipende dalla situazione specifica e dalla posizione del tetto rispetto al suo intorno, che può essere composto da altri edifici, strade o vegetazione, ovvero materiali diversi a temperatura (e di conseguenza anche radianza) sensibilmente differente; la semplificazione precedente ( $L_b=L_T$ ), introdotta da Goldstein, implica che la copertura in esame sia adiacente solo ad un edificio con le stesse caratteristiche strutturali, gli stessi materiali e la stessa temperatura superficiale.

### 3.4 Il ruolo dell'emissività e dello Sky View Factor

Nelle applicazioni termografiche di tipo quantitativo, mirate al calcolo della temperatura superficiale degli oggetti al suolo, bisogna tenere conto sia delle proprietà fisiche dei materiali che della loro configurazione geometrica: i due fattori principali che descrivono queste proprietà sono l'emissività e lo Sky View Factor.

Come già descritto nel primo capitolo, l'emissività è una proprietà fisica del materiale che descrive la sua capacità di emettere radiazioni elettromagnetiche in rapporto a quella di un corpo nero alla stessa temperatura.

Nei rilievi termografici terrestri per stimare sul campo l'emissività di un corpo viene utilizzata una procedura empirica "non contact", che consiste nell'applicare sul corpo un nastro ad alta-emissività (solitamente nastro isolante nero) o dipingere la superficie con vernici ad alta emissività; inserendo come input della termocamera questo valore e gli altri parametri necessari è possibile stimare la temperatura della superficie (nell'ipotesi che essa abbia raggiunto l'equilibrio termico con il nastro).

L'emissività *broadband* è quella riferita a tutto lo spettro elettromagnetico, e risulta utile per calcolare lo scambio di calore per irraggiamento tra le superfici nei modelli energetici. L'emissività effettiva da inserire nel sensor model per il calcolo della ground radiance è differente, e si riferisce solamente alla banda spettrale coperta dal sensore; in questo caso viene definita come (Allison, 2007):

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\int_0^{\infty} \varepsilon_{\lambda} * L_{\lambda} * R'(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} L_{\lambda} * R'(\lambda) d\lambda}$$

in cui  $\varepsilon_{eff}$  è l'emissività effettiva nella banda spettrale del sensore,  $\varepsilon_{\lambda}$  è l'emissività spettrale,  $L_{\lambda}$  è la radianza



monocromatica ( $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ ) e  $R'(\lambda)$  è la risposta spettrale normalizzata del sensore. Anche se la differenza dal punto di vista teorico è ben definita, spesso a causa di difficoltà nella misura (che dipende dalla risposta del sensore utilizzato, oltre che dalla temperatura dei campioni) ai fini operativi le due emissività vengono considerate uguali.

Misure rigorose in situ dell'emissività effettiva dei materiali di copertura risultano complicate e proibitivamente costose, in quanto necessitano di strumentazioni apposite come gli spettroradiometri. D'altronde effettuare misure di laboratorio per rilievi aerei risulta piuttosto complicato, sia per la varietà di materiali che compongono il complesso tessuto urbano che per la variabilità delle condizioni geometriche e atmosferiche che si manifesta durante i rilievi sul campo.

La norma ASTM E 1933-99a indica due metodi rapidi per la misura dell'emissività tramite camere infrarosse: il metodo a contatto prevede l'utilizzo di una termocoppia o di uno strumento analogo per la misura diretta della temperatura, mentre il metodo non-contact utilizza un materiale di emissività nota (nastro adesivo o vernice) per alterare l'emissività della superficie. In questo caso la temperatura del campione deve essere stabile e almeno  $10^{\circ} C$  più alta o bassa rispetto alla temperatura atmosferica; inoltre la termocamera deve prevedere la possibilità di impostare l'emissività e la temperatura di background, che viene stimata utilizzando pannelli altamente riflettivi.

E' da evidenziare anche come, a differenze delle analisi condotte su immagini termiche satellitari a risoluzione moderata (in cui i pixels solitamente presentano copertura mista), nel caso della termografia aerea i pixels possono essere considerati omogenei: in questi casi l'emissività dipende principalmente dal tipo di materiale, e gli algoritmi di calcolo sono completamente

differenti (Bitelli & Conte, 2011b).

Sono state sperimentate diverse procedure per la stima dell'emissività dei materiali di copertura in ambiente urbano (Allison, 2007): alcune utilizzano due sensori infrarossi operanti in bande spettrali differenti ottenendo il valore di emissività dall'uguaglianza tra le misure di temperatura (ignorando, però, le risposte spettrali).

Considerate le oscillazioni continue dell'aereo durante le acquisizioni, la traiettoria spaziale delle strisciate e le diverse inclinazioni di tutte le superfici che compongono ognuna delle innumerevoli scene acquisite durante un rilievo termografico, le configurazioni geometriche che possono verificarsi sono infinite; di conseguenza risulta importante valutare anche la variazione dell'emissività al variare dell'angolo di vista (*line of sight angle*), che secondo alcuni autori è rilevante ai fini delle misure.

Nella tesi di Allison, il *line of sight angle* viene calcolato come attributo del singolo edificio, ricavando la soluzione trigonometrica della figura schematizzata in fig. 3.10, dove  $\omega$  è l'angolo al sensore,  $\beta$  è l'angolo tra la retta di massima pendenza della falda e la normale alla linea di volo, e  $\theta$  è la pendenza della falda. L'angolo tra il sensore e la normale al tetto risulta quindi

$$\alpha = \arccos(\cos 90 - \omega * \cos \beta * \cos 90 - \theta + \cos \omega * \cos \theta )$$

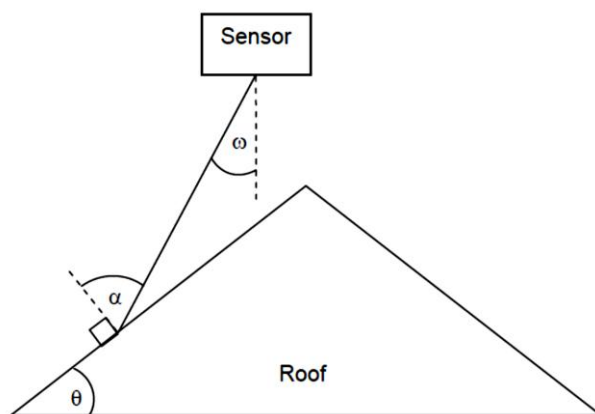


Fig. 3.10 – Schema per il calcolo del Line of sight angle (da Allison, 2007)

Per calcolare quindi il valore di emissività al variare dell'angolo di vista si utilizza una formula empirica sviluppata da Snyder & Schott (1994) su campioni d'asfalto, e confermata da altri studiosi, secondo cui il suo valore è correlato all'emissività  $\varepsilon_0$  misurata per superficie normale alla linea di vista dalla relazione

$$\varepsilon_\alpha = \varepsilon_0 * \frac{1}{0,009^{0,07}} * 0,9 * \cos(\alpha)^{0,07}$$

Per il rilievo sulla città di Nottingham, Allison (2007) individua due soli materiali di copertura (tegole d'ardesia naturale e tegole rosse in cotto), le cui emissività  $\varepsilon_0$  vengono ottenute da misure di laboratorio secondo il metodo a contatto definito dalla ASTM E1933-99a riscaldando i materiali in forno fino a circa 50°C e misurandone la temperatura in continuo tramite termocoppia. Per limitare le variazioni della background temperature i campioni vengono posizionati in un box e osservati tramite un'apertura. Nello studio viene trascurata la differenza tra le risposte spettrali della camera termica utilizzata (FLIR ThermoVision A20M) e il sensore aereo (UK Thermal Imaging Common Modules - TICM Class 2).

In tab. 3.1 sono riportati i risultati sperimentali ottenuti da Allison e da Schott & Wilkinson, citati dallo stesso Allison.

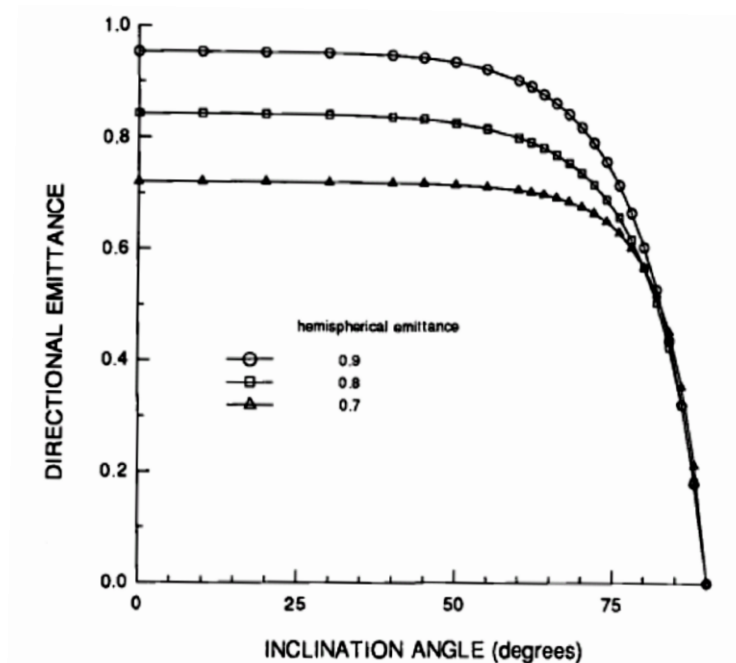
Tipo	Descrizione	Emissività $\varepsilon_{eff}$
Tegole in asfalto	bianche	0,93
	grigie	0,89
Tegole in amianto	bianche	0,90
	grigie	0,89
Tegole in ardesia	grigie	0,85
	rosse	0,84
	secondo Allison	0,925
Tegole in legno		0,82
Cartone catramato		0,88

Fibra minerale pesante		0,87
Fibra minerale leggera		0,92
Coppi rossi		0,82
	secondo Allison	0,881

*Tab. 3.1 – Emissività per alcuni materiali di copertura*

I risultati sperimentali dei due autori per le coperture in ardesia e in argilla rossa sono diversi, probabilmente a causa del tipo di sensore utilizzato e delle diverse procedure seguite (oltre che a possibili differenze nella composizione chimica e nello stato superficiale del materiale).

Come si può notare dalla fig. 3.11 (derivata per campioni con differente emissività emisferica), l'emissività direzionale ha una dipendenza dall'angolo di vista trascurabile per angoli inferiori ai 60°, mentre scende rapidamente a 0 per angoli superiori: questo fenomeno è confermato dalle teorie dell'elettromagnetismo (Daryabegi et al., 1992).



*Fig. 3.11 – Variazione dell'emissività con l'angolo di inclinazione della superficie (da Allison, 2007)*

Trascurare la variazione di  $\epsilon$  con l'angolo di vista comporta una sovrastima dell'emissività, che si traduce in una sottostima della temperatura reale dell'oggetto; nel caso di Nottingham, non potendo distinguere l'orientamento delle diverse falde sulle immagini termiche, per ogni edificio viene calcolata solo per la falda più vicina alla linea di volo.

All'aumentare della risoluzione spaziale del sensore la modellazione dei fenomeni direzionali diventa maggiormente dispendiosa, a causa della complessità delle coperture reali (in particolare inclinate) che presentano superfici e materiali (aperture, scossaline, prese d'aria, camini): in questi casi non sarebbero sufficienti né un DSM ad alta risoluzione né gli attributi sulla pendenza delle falde degli edifici, e si renderebbe indispensabile un dato ad altissima densità spaziale (es. LIDAR) che possa rappresentare con affidabilità l'orientamento relativo dei diversi elementi.

Le stesse considerazioni valgono per il calcolo dello Sky View Factor (SVF) dell'edificio, ovvero della frazione di superficie emisferica del cielo che risulta visibile dalla copertura espressa in forma adimensionale. Esso regola non solo la quantità di radiazione "fredda" proveniente dall'atmosfera che viene riflessa dalla copertura ma anche lo scambio di calore radiativo tra la superficie del tetto, l'arco celeste e le superfici adiacenti; il suo valore è funzione non solo dell'orientamento del tetto e della sua pendenza, ma anche della configurazione geometrica di tutti gli oggetti che lo circondano. Per un tetto piano isolato e in assenza di ostacoli adiacenti, il suo valore è 1 in quanto risulta visibile tutta la superficie emisferica del cielo.

In letteratura sono state proposte diversi algoritmi per il calcolo dello SVF (Allison, 2007):

- le più semplici considerano solamente le dimensioni

dell'edificio, la distanza reciproca con gli edifici adiacenti e la pendenza della copertura.

- Schott e Wilkinson calcolano nel punto centrale della copertura l'angolo compreso tra la direzione della falda e la congiungente con il colmo della copertura adiacente, e ottengono lo Sky View Factor dividendo per  $180^\circ$  (come schematizzato dalla fig. 3.12). Questo metodo sovrastima l'SVF perché trascura che la superficie di volta celeste visibile aumenta avvicinandosi all'orizzonte.
- Schott (1997) lo calcola come funzione della sola pendenza della falda  $\theta$  secondo l'equazione seguente

$$F = 1 - \frac{1}{2} * \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)$$

- alcuni modelli invece calcolano per ogni superficie tre fattori di vista  $F_{sky}$ ,  $F_g$ , e  $F_a$  riferiti rispettivamente al suolo, al cielo e all'intorno dell'edificio, con equazioni del tipo

$$F_{sky} = \frac{(1 + \cos\theta)}{2} * \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

$$F_g = \frac{(1 + \cos\theta)}{2}$$

$$F_a = 1 - F_g - F_{sky}$$

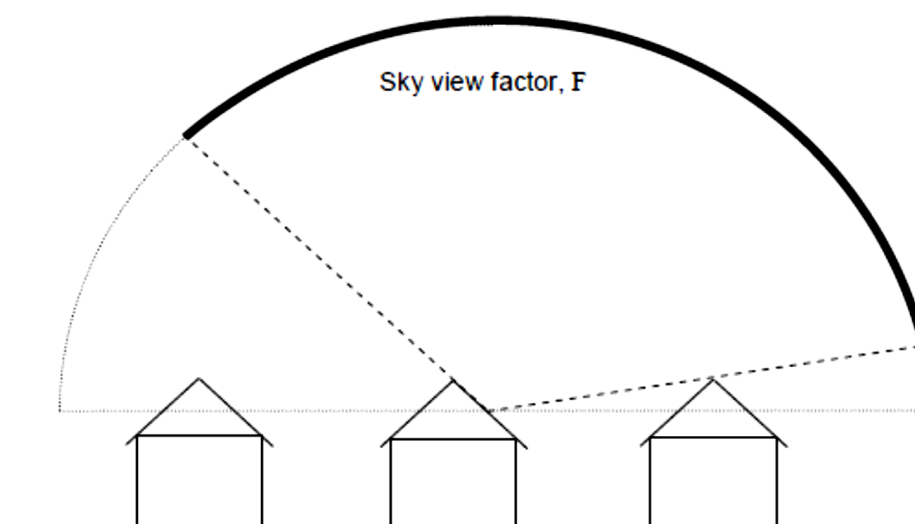


Fig. 3.12 – Schematizzazione bidimensionale dello SVF (da Allison, 2007)

La tabella 3.2 riporta i valori ottenuti per superfici a diverso

orientamento e per diversi tipi di *surroundings* (Clarke, 2001).

Configurazione	$F_{sky}$	$F_g$	$F_a$
Centro città: superficie verticale, edifici adiacenti della stessa altezza	0,36	0,36	0,28
Centro città: superficie verticale, edifici adiacenti più alti	0,15	0,33	0,52
Area urbana: superficie verticale	0,41	0,41	0,18
Area rurale: superficie verticale	0,45	0,45	0,10
Area urbana: superficie inclinata	0,50	0,20	0,30
Area rurale: superficie inclinata	0,50	0,30	0,20
Area rurale: edificio isolato	0,50	0,50	0

Tab. 3.2 – Fattori di vista per diverse configurazioni secondo Clarke, 2001

- il software gratuito Rayman (<http://www.mif.uni-freiburg.de/rayman/index.htm>) permette di calcolare lo SVF di qualsiasi punto di una superficie inserendo come input il modello tridimensionale degli edifici (Allison, 2007, ne sconsiglia l'uso su aree piuttosto estese a causa dell'eccessivo onere computazionale richiesto)
- altri modelli utilizzano un modello di elevazione digitale in formato raster, simulando di avere un'elevatissimo numero di fonti luminose distribuite nello spazio e calcolando il numero di volte in cui ogni pixel risulta illuminato; lo SVF è il rapporto tra questo numero e il numero di fonti luminose considerato (questo metodo pixel-based ignora l'inclinazione della superfici che compongono la scena);
- sono anche state sviluppate estensioni più o meno complesse per il calcolo dell'SVF in ambito GIS utilizzando come input il modello tridimensionale degli edifici.

- in alcuni casi, infine, viene considerata valida l'approssimazione di coperture piane e alla stessa altezza, e viene perciò assunto uno SVF pari a 1 (trascurando di conseguenza l'influenza di LB nel calcolo della ground radiance).

Come si può immaginare i risultati ottenuti secondo le varie tecniche sono largamente variabili, e non è stata ancora definita una metodologia standard e affidabile per il calcolo dello Sky View Factor: in aree densamente urbanizzate le configurazioni geometriche reciproche delle diverse superfici possono essere davvero molto complesse (*fig. 3.13*) e di conseguenza risulta ancor più complicato calcolare un valore che sia realmente accurato.



*Fig. 3.13 – Molteplicità di materiali e orientamenti nelle coperture*



### **3.5 Alcune esperienze di termografia aerea in area urbana**

Una revisione di diversi utilizzi di immagini infrarosse per l'analisi delle prestazioni energetiche degli edifici è contenuta nella tesi di David Allison, il cui argomento è la misura dello spessore d'isolamento delle coperture edilizie da termografia aerea. Secondo Allison, il primo utilizzo in quest'ambito risale alla crisi del petrolio del 1973, quando l'Organization of the Petroleum Exporting Countries (OPEC) duplicò il prezzo dell'esportazione d'idrocarburi e impose l'embargo agli Stati Uniti D'America. Le analisi al tempo erano puramente qualitative, e perciò abbastanza rapide da effettuare anche in assenza di dati ancillari. Nei successivi due decenni questo tipo di tecniche si è sviluppata: la termografia aerea è stata utilizzata con successo per identificare difetti d'isolamento o danni dovuti all'umidità sui tetti degli edifici, per riconoscere perdite in tubature (anche interrate) contenenti fluidi a temperatura maggiore di quella ambiente (es. vapore acqueo) o per monitorare impianti di teleriscaldamento (Allison, 2007).

Con il continuo miglioramento delle prestazioni dei sensori, l'interesse della comunità scientifica si è concentrato sull'utilizzo del termo-infrarosso per analisi di tipo quantitativo: il primo tentativo in tal senso (Goldstein, 1978) definisce sia il calcolo della temperatura dei tetti dalla radianza rilevata al sensore che il trasferimento di calore attraverso i tetti degli edifici come modelli numerici, introducendo come parametri l'emissività della superficie, lo Sky View Factor, la downwelling radiance, la broadband sky temperature e la risposta spettrale del sensore ma trascurando, però, gli effetti dell'atmosfera e della upwelled radiance. Goldstein concluse che non si può quantificare

lo spessore di isolamento di ogni singolo edificio, ma che seppur con un buon grado di approssimazione, è possibile identificare i tetti con bassa resistenza termica conoscendo con esattezza il valore di emissività della copertura e le condizioni microclimatiche interne all'edificio.

I primi studi quantitativi che hanno avuto successo nel misurare lo spessore d'isolamento da immagini infrarosse aeree sono stati effettuati dal Calspan/Rochester Institute of Technology (Schott et al., 1982): essi includono nel sensor model tutti i parametri atmosferici e fisici (trasmissività, upwelling e downwelling radiance, background temperature, sky view factor, emissività variabile con la line of sight) ed utilizzano misure di temperatura terrestri per ridurre i bias nel calcolo delle temperature.

I fattori che influiscono maggiormente sulle analisi di tipo quantitativo della temperatura superficiale delle coperture elencati dai diversi autori sono (Allison, 2007):

- velocità del vento, temperatura del cielo e ventilazione della copertura, secondo Goldstein
- la ventilazione dell'attico e gli effetti topografici sulla circolazione dell'aria, secondo il Canada Centre for Remote Sensing (Brown & Cilhar, 1978);
- la velocità del vento, la temperatura dell'aria, le variazioni di emissività e la formazione di rugiada, per il National Bureau of Standards (Treado & Burch, 1983).

Hay et al. (2011) citano invece alcuni rilievi termografici aerei che non sono andati a buon fine, come quelli sul borgo londinese di Haringey del 2007 e sulla città di Exeter del 2009: quest'ultimo prevedeva semplicemente la pubblicazione online di una mappa di temperatura, non fornendo né informazioni sugli edifici né alcuna possibilità di interazione da parte dell'utente finale. Il rilievo sul borgo di Haringey mostrava ulteriori

problemi dovuti a difficoltà tecniche: le scene erano state acquisite in diverse date con condizioni atmosferiche differenti, non permettendo la creazione di un mosaico significativo in termini di temperatura; inoltre le singole immagini erano acquisite su supporto analogico e venivano successivamente scansionate, digitalizzate, georiferite e mosaicate producendo degli errori significativi.

La tesi di Allison si articola in quattro parti: la misura della temperatura del tetto da immagini superficiali, la sua correlazione con lo spessore d'isolamento, l'applicazione di modelli energetici per gli scambi termici della copertura e la verifica dell'accuratezza dei risultati. Inoltre, vengono proposti e analizzati diverse metodologie per il calcolo delle proprietà atmosferiche necessarie (upwelling e downwelling radiance, trasmissività atmosferica, broadband sky temperature) e delle proprietà fisiche e geometriche delle coperture (emissività, Sky View Factor).

Allison conclude che la temperatura superficiale del tetto dipende dalle condizioni metereologiche, dalle caratteristiche dell'edificio e del suo intorno e che, per calcolare lo spessore d'isolamento, è necessario quantificare con precisione tutti gli scambi di calore ed energia (il che richiede, oltre che le conoscenze teoriche e le abilità tecniche, una rilevante mole di dati aggiuntivi).

Il rilievo termico sulla città di Nottingham è stato effettuato tramite il sensore britannico di tipo CMT Thermal Imaging Common Modules (TICM), installato su una piattaforma aerea che sorvolava l'area della città di Nottingham ad un'altezza media di circa 760 m; lo swath medio risultò di circa 880 m, la risoluzione del pixel a terra di circa 1m x 1m e l'accuratezza termica dichiarata di 0,2 °C.

Per lo studio effettuato sono stati utilizzati, oltre alle immagini termiche acquisite durante il rilievo aereo, dati ancillari provenienti da diverse fonti:

- da cartografia numerica per ottenere le caratteristiche geometriche degli edifici (posizione, lunghezza e larghezza, distanza e orientamento rispetto alla linea di volo);
- da rilievo terrestre diretto per l'identificazione del tipo di edificio, della pendenza e materiale costruttivo delle falde del tetto, e dell'emissività della superficie;
- da software specifici per il calcolo dello Sky View Factor (SVF);
- da reti meteorologiche di misura per la temperatura dell'aria e la velocità del vento;
- da database catastali per ottenere informazioni sullo spessore d'isolamento;
- da radiosonde per la modellazione delle caratteristiche atmosferiche al variare della quota e per il calcolo dei vari fattori di radiazione;
- dalla risposta spettrale del sensore per il calcolo corretto della temperatura dal sensor model.

Oltre ai datasets appena citati bisogna naturalmente ricordare i dati necessari per eseguire la georeferenziazione delle immagini, costituiti dalle registrazioni dei sistemi GPS e IMU installati sulla piattaforma aerea, delle registrazioni della stazione permanente GPS/GNSS, del Digital Elevation/Digital Surface Model per correggere le distorsioni sulle immagini dovute alle variazioni altimetriche sulla scena.

Nello studio di Allison, le immagini termiche delle 30 strisciate adiacenti sono state corrette geometricamente e georiferite dalla BGS, che ha fornito ortomosaici a 8 bit (0-255) di risposta media al sensore; in quel caso lo scarto quadratico

medio risultava di  $\pm 2,3$  m sull'asse y e  $\pm 3,25$  m sull'asse x (calcolato per 45 ground control point distribuiti sull'immagine). Uno dei problemi principali è stato il basso livello di contrasto delle immagini termiche, che ha reso difficile l'individuazione manuale dei tie points necessari all'ortorettifica (l'ottimizzazione del contrasto è stata eseguita successivamente in ambito GIS sull'intero fotomosaico); inoltre, per effettuare il merging delle diverse strisciate adiacenti, è stata effettuata un'inopportuna normalizzazione radiometrica delle diverse strisciate, che, alterando i valori di DN originali, ha reso maggiormente complicata l'analisi quantitativa dei dati.

Il processo di georeferenziazione ha evidenziato diversi problemi sull'immagine finale: l'esatta posizione degli edifici è difficile da individuare, esistono aree con assenza di dato e le strade e i contorni non risultano dritti e lineari come dovrebbero (i tie points sono stati selezionati solo in corrispondenza di spigoli di edificio). In questo caso, per ovviare agli errori geometrici dell'ortomosaico termico per il calcolo della temperatura media superficiale del tetto, è stato usato un buffer di 3,5 m interno ad ogni singolo edificio.

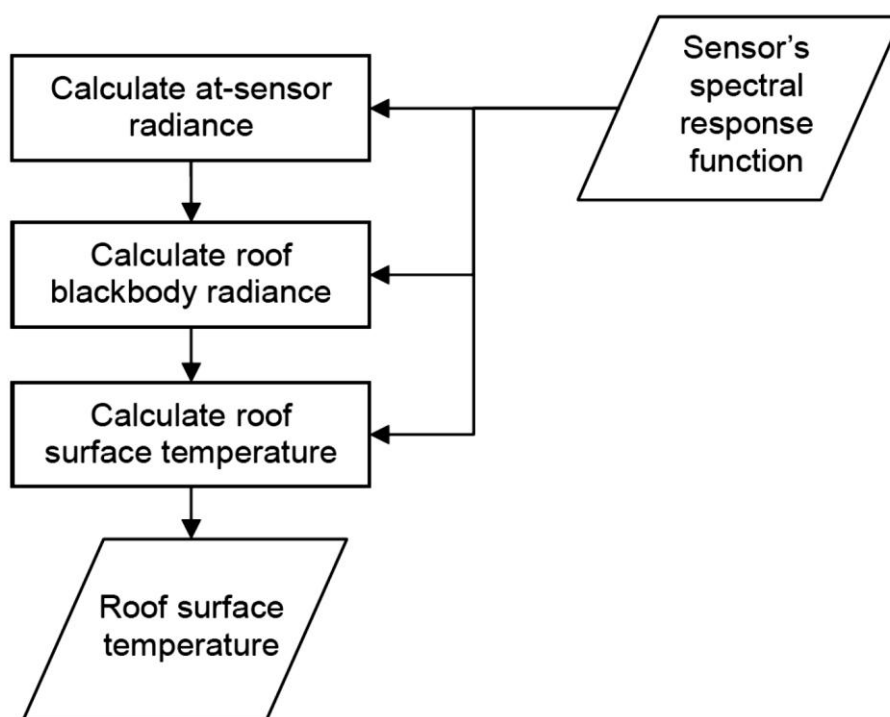
Il sensor model utilizzato da Allison prevede il calcolo della temperatura rappresentativa della superficie del tetto tramite (*fig. 3.14*):

- calcolo della radianza al sensore dal DN delle immagini termiche;
- calcolo della radianza di corpo nero del tetto con la correzione e modellazione delle diverse fonti d'errore (effetti atmosferici, direzionali, dell'emissività, della radianza riflessa);
- calcolo della temperatura superficiale dei pixels delle immagini tramite una relazione lineare empirica tra radianza

di corpo nero e temperatura;

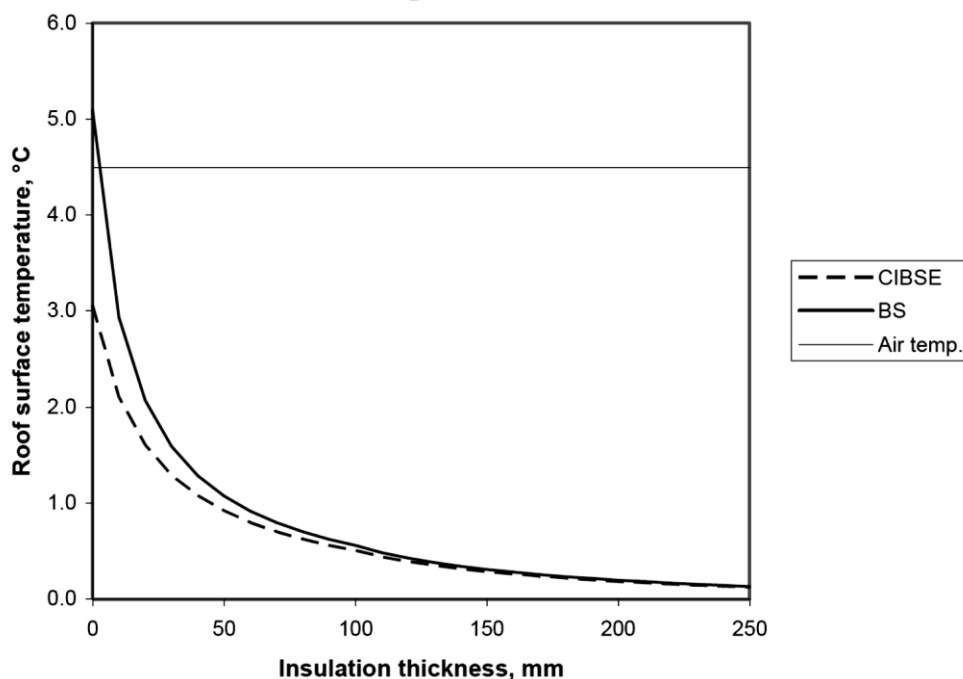
- applicazione di un buffer interno ai poligoni degli edifici per il calcolo della temperatura superficiale media associata come attributo ad ogni singolo edificio.

Nel caso descritto da Allison è stato necessario implementare nel calcolo la risposta spettrale del sensore ed effettuare una calibrazione dello stesso (considerando il rapporto tra il DN e la radianza), in quanto le immagini termiche di input erano formate dai valori di DN a 8 bit: nella sperimentazione descritta al cap. 4 per il calcolo della radianza al sensore è sufficiente l'inversione della legge di Planck sulle lunghezze d'onda acquisite dalla termocamera aerea, in quanto le immagini acquisite sono già convertite in valori di temperatura e la termocamera aerea ha operato durante i rilievi con la correzione atmosferica delle immagini disattivata.



*Fig. 3.14 – Algoritmo per il calcolo della temperatura superficiale secondo Allison (2007)*

Come evidenziato da Allison (2007), la relazione tra il livello d'isolamento di una copertura e la sua temperatura superficiale non è lineare e coinvolge diversi altri parametri. A titolo d'esempio il grafico 3.15 mostra la relazione tra la temperatura superficiale e lo spessore d'isolamento per un edificio tipo (con tetto termicamente omogeneo e pendenza delle falde 1:1) calcolato secondo i metodi British Standard e CIBSE per temperatura dell'aria esterna pari a 4,5°.



*Fig. 3.15 – Temperatura superficiale del tetto al variare dello spessore d'isolamento (da Allison, 2007)*

Dall'applicazione del building model si nota come la differenza nella temperatura della copertura calcolata per un edificio tipo con 50 mm d'isolamento e per uno con 250 mm d'isolamento (valore ritenuto ottimale) sia, per il caso in esame, solamente di 0,4°C, ossia un valore molto difficile da stimare con precisione anche usando strumenti terrestri (una termocoppia standard ha accuratezza intorno ai  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ ). Ciò comporta che per discriminare i differenti livelli d'isolamento è necessario raggiungere delle accuratezze nel calcolo della temperatura molto

elevate, nell'ordine di  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$  (Allison, 2007).

Per questo è stato necessario sviluppare anche un modello energetico dell'edificio, che consentisse di correlare le due grandezze: analogamente per il progetto Energycity descritto al cap. 4 il modello energetico è stato sviluppato dalla Budapest University of Technology and Economics - Department of Environmental Economics, partner del progetto.

Nella tesi di Allison viene anche eseguita una semplice analisi di sensitività mirata ad individuare i fattori che maggiormente incidono sui valori di temperatura superficiale calcolata secondo il sensor model. I risultati mostrano come la pendenza del tetto ha effetti relativamente limitati sui valori di temperatura; i fattori che invece appaiono più rilevanti sono, nell'ordine, la trasmissività dell'atmosfera, l'emissività della superficie e la upwelled radiance. Un limite dell'analisi è che ignora l'interdipendenza tra i parametri (ad esempio l'influenza della pendenza della falda sui valori di emissività e di SVF). Allison evidenzia, inoltre, come la differenza nella temperatura superficiale tra due coperture con spessore d'isolamento di 50 e 250 mm (stimata intorno a  $0,5^{\circ}\text{C}$ ) sia dello stesso ordine di quella prodotta da un errore dell'1% sulla  $\tau$  o del 2% sulla  $\varepsilon_{\text{eff}}$ , e sia quindi impossibile discriminare adeguatamente il diverso livello d'isolamento degli edifici.

Per ridurre l'incertezza nei risultati ed effettuare misure di temperatura superficiale più precise è necessario (Allison, 2007):

- utilizzare camere termiche con prestazioni adeguate in termini di risoluzione spaziale e spettrale, frequenza d'acquisizione, NETD;
- effettuare il rilievo in condizioni atmosferiche ideali, con temperatura atmosferica più bassa possibile, cielo sereno e vento debole o assente (condizioni che si verificano con



frequenza davvero limitata durante il corso dell'anno);

- misurare con adeguata accuratezza e contemporaneamente al rilievo tutti le grandezze atmosferiche utilizzate nel calcolo della temperatura superficiale, in modo da ridurre gli errori nei parametri di input.

Allison conclude comunque che anche rispettando tutte queste condizioni è possibile solamente identificare gli edifici che presentano uno spessore d'isolamento basso o inesistente piuttosto che discriminare tra i diversi livelli d'isolamento e che, comunque, per l'applicazione di queste tecniche sarebbe necessario conoscere anche caratteristiche strutturali degli edifici (forma della copertura, numero di ricambi d'aria) e le condizioni microclimatiche di ogni sito (temperatura dell'aria, velocità e direzione vento, temperatura di *background* effettiva).

La tesi di Allison, anche se completa ed esaustiva, presenta alcune limitazioni di rilievo e si basa su semplificazioni o assunzioni, come:

- sono presenti inevitabili errori di correzione geometrica dei mosaici termici e nell'operazione di mosaicatura è stata applicata una normalizzazione radiometrica che altera i valori reali di radianza rilevata dal sensore;
- le osservazioni dei profili atmosferici, derivate da radiosonde, sono localizzati ad alcuni chilometri di distanza rispetto all'area di studio;
- viene trascurata l'influenza dell'Urban Heat Island sulle condizioni microclimatiche;
- l'emissività viene misurata solamente per due materiali di copertura rappresentativi dell'area in esame e con uno strumento differente da quello usato per il rilievo aereo;
- la temperatura di background viene assunta uguale alla temperatura superficiale della copertura;

- non vengono considerate le condizioni climatiche su microscala;
- il modello per il calcolo dello Sky View Factor è alquanto semplificato;
- viene ipotizzata l'assenza di rugiada, pioggia o ghiaccio sulle coperture;
- molti parametri vengono calcolati in ambito GIS solamente per il punto centrale della copertura, o per una sola falda, mentre sarebbe necessaria una modellazione più completa;
- il sensor model non ha subito alcuna validazione, in assenza di dati di verità a terra (Allison consiglia la collezione di un set di dati di temperatura a terra, anche per la valutazione dell'incertezza nelle misura di temperatura).
- per analisi su scala urbana bisogna tener conto sia della varietà di materiali di copertura che compongono il tessuto cittadino (di cui non esiste allo stato dell'arte un database di emissività spettrali) che delle diverse tipologie edilizie.

L'incertezza nella misura della temperatura superficiale è dovuta sia alle fonti d'errore intrinseche del sensore come la non linearità della risposta, la stabilità dell'eventuale sistema di raffreddamento ed il rumore del segnale che alle incertezze nella misura di tutti i parametri esterni come emissività, temperatura atmosferica, trasmittività.

Un altro progetto, tuttora in fase di sviluppo, che sfrutta le potenzialità offerte dalla termografia aerea per l'analisi delle prestazioni energetiche degli edifici è il progetto HEAT (Home Energy Assessment Technologies), sviluppato dal Dipartimento di Geografia dell'Università di Calgary.

HEAT è finalizzato alla creazione di un servizio GeoWeb gratuito di supporto spaziale delle decisioni basato sulla mappatura del calore residuo (waste heat) della città di Calgary, e si articola in

tre fasi: durante la prima (phase I pilot) vengono testati strumenti e metodi su un'area ristretta, la comunità di Brentwood, che include solamente 358 edifici. La seconda fase (Phase II pilot) prevede l'utilizzo di un sensore più avanzato e l'estensione ad un'area maggiore, con la valutazione dei risultati su circa 110000 edifici di caratteristiche note (da dati catastali esistenti forniti dalla città di Calgary, mentre la terza fase (Phase III pilot) punta ad estendere ulteriormente la superficie d'analisi all'intera città di Calgary, che copre un'area di 24 x 35 Km e include più di 300000 edifici.

Durante la prima fase è stato utilizzato un sensore pushbroom TABI-320, sensibile alle lunghezze d'onda tra gli 8 e i 12  $\mu\text{m}$ , che ha permesso di coprire l'area di Brentwood con un mosaico termico di 600 x 2000 pixel con una risoluzione spaziale di 1m x 1m e una risoluzione termica nominale di 0,1° C. La scena è composta da due sole strisciate con una sovrapposizione trasversale del 30%.

Durante le fasi 2 e 3 è previsto l'utilizzo di un nuovo sensore lineare, il TABI-1800, che permetterà di coprire l'area della città di Calgary con un numero limitato di strisciate ( $\cong$  160) ottenendo la medesima risoluzione spaziale della fase precedente (Hay et. Al., 2011).

La piattaforma geoweb di HEAT consente la visualizzazione intuitiva e rapida del calore residuo che abbandona un edificio e della sua posizione. Tra le caratteristiche della piattaforma, accessibile al sito [www.wasteheat.ca](http://www.wasteheat.ca) (con username e password: beta), si ricordano:

- la possibilità di evidenziare le sei zone più calde della copertura di ogni singolo edificio (tre sulla sua superficie, tre lungo il suo perimetro);

- la valutazione multi-scala delle prestazioni energetiche delle costruzioni, che può riferirsi al singolo edificio, all'isolato, al quartiere o all'intera città;
- la definizione e il calcolo di un HEAT Score, un punteggio empirico che permette la comparazione delle prestazioni energetiche dei diversi edifici, e delle diverse comunità;
- la possibilità di visualizzare contemporaneamente la firma termica della copertura di un edificio e la corrispondente immagine ottica terrestre mediante Google Street View, permettendo di valutare interattivamente le possibili cause di dispersione termica (es. camini, difetti d'isolamento sul perimetro, ponti termici in corrispondenza degli infissi, etc.);
- la capacità teorica di operare anche senza la disponibilità di mappe vettoriali con il contorno degli edifici, estraendo i poligoni direttamente dall'immagine termica mediante classificazione object-based;
- la possibilità di inserire informazioni geospaziali volontarie da parte degli utenti del sistema (materiale di copertura, area dell'edificio, sistema di riscaldamento) utili come parametri di input nel modello per il calcolo dei consumi energetici e della produzione di CO<sub>2</sub>.

L'acquisizione durante la prima fase del progetto è stata effettuata con il sensore TABI-320 (array lineare di 320 pixels) in piena notte (alle 4.00 del mattino) ad un'altezza di volo di circa 1000 m, con condizioni di cielo sereno. Le immagini (calcolate inizialmente con un valore di emissività di 0,94) sono state prima convertite in valori di radianza, per poi essere riconvertite in valori di temperatura corretta considerando un'emissività costante di 0,91 (corrispondente al valore reperibile in letteratura per le asphalt shingles, che costituiscono la totalità

delle coperture presenti).

Per la correzione geometrica delle immagini sono state utilizzate una mappa catastale contenente i contorni degli edifici in combinazione con un'ortofoto RGB con risoluzione al suolo di 30 cm, dalle quali sono stati ricavate le coordinate di 286 ground control points; il warping è stato effettuato mediante una polinomiale del 4° ordine, applicando un'algoritmo di resampling Nearest Neighbour e ottenendo un RMSE di 1,207 pixels (equivalente a poco più di 1 m). Il mosaico termico finale mostra un buona corrispondenza con le mappe catastali, anche se sono presenti alcuni errori residui per edifici il cui contorno risulta discontinuo o parzialmente mancante.

Tra le peculiarità del sistema Heat si ricorda l'implementazione del Geographic Object Based Image Analysis (GEOBIA) per l'estrazione degli edifici direttamente dalle immagini termiche; per la fase 2, l'algoritmo analizza il matching tra i poligoni derivati dalla classificazione object based delle immagini termiche e quelli presenti sulle mappe catastali e segnala la necessità di effettuare un'analisi visiva nel caso ci sia bassa corrispondenza tra i due.

Il processo di generazione di statistiche e hotspot richiede come dati d'input l'immagine termica (in formato raster) ed eventualmente la cartografia contenente le sagome degli edifici (in formato vettoriale). Nel caso in cui quest'ultima non sia disponibile l'algoritmo GEOBIA provvede alla classificazione object-based dell'immagine con l'estrazione dei poligoni, mentre altrimenti si applica una procedura iterativa che rifinisce gli oggetti estratti dal GEOBIA in base alla corrispondenza con la cartografia vettoriale esistente (se viene riscontrata una bassa corrispondenza il poligono viene segnalato per un'analisi visiva).

Dalla sovrapposizione tra le mappe termiche georiferite e la

cartografia vettoriale è possibile calcolare gli hotspots per ogni edificio; per evitare effetti di clustering viene stabilita la distanza minima in pixels tra due hotspots.

Sull'area di Brentwood le mappe catastali contenevano anche una serie di attributi strutturali quali l'età dell'edificio, l'area e il tipo di costruzione.

Hay definisce waste heat qualunque valore di temperatura superficiale dell'immagine termica che sia maggiore della temperatura atmosferica ambiente all'epoca del rilievo, secondo la relazione

$$\text{Waste Heat} = \text{House Temperature} - \text{Ambient Temperature}$$

poiché ad una qualsiasi differenza di temperatura corrisponde una dispersione di calore dell'involucro edilizio verso l'ambiente esterno.

Per effettuare dei confronti numerici tra i valori di waste heat prodotti dai diverse città, comunità o singoli edifici viene definito l'Heat Score, basato sulla standardizzazione (o z-score), ovvero sul procedimento che riconduce una variabile aleatoria distribuita secondo una media  $\mu$  e varianza  $\sigma^2$  ad una variabile aleatoria con distribuzione "standard", ossia di media zero e varianza 1.

Il procedimento prevede di sottrarre alla variabile aleatoria la sua media e dividere il tutto per la deviazione standard  $\sigma$ :

$$z \cdot \text{score} = \frac{(x - \mu)}{\sigma}$$

Per ognuno degli edifici in esame viene calcolata la z-score utilizzando come variabile aleatoria la temperatura media all'interno del suo perimetro, e come valor medio quello riferito a tutti gli edifici della città; avendo la z-score una distribuzione gaussiana standard il 99,98% delle osservazioni ricade nell'intervallo tra -3,49 e +3,49). Il passaggio successivo consiste

nella calcolo dell'HEAT Score e nella sua conversione in valori da 0 a 100 (Hay et al., 2011):

$$HEAT\ Score = \frac{(z \cdot score + 3,5)}{7} * 100$$

Il significato dell'HEAT Score di un edificio risulta abbastanza intuitivo: un valore dell'85% significa che quell'edificio produce un waste heat maggiore rispetto all'85% degli edifici presenti sulla stessa area. I criteri utilizzati per calcolare l'HEAT Score di un singolo edificio possono essere estesi anche alla comunità (considerando come variabile l'HEAT Score e come popolazione tutti gli edifici della comunità) o alla città intera (considerando come variabile il valore medio dell'HEAT Score e come popolazione tutti gli edifici della città).

Nella fase 2 viene testata l'applicabilità del sensore TABI-1800 su un'area vasta come la città di Calgary, viene sviluppato ed applicato un'algoritmo di mosaicking object-based (OBM), viene applicata una correzione per l'emissività delle coperture (Emissivity Modulation) e una tecnica per correggere le microvariazioni spaziali dei parametri atmosferici sulle scene (Thermal Urban Road Normalization - TURN).

L'algoritmo di mosaicking object-based è finalizzato ad evitare che le coperture presenti sull'area di sovrapposizione tra le strisciate mostrino caratteristiche radiometriche differenti nelle immagini acquisite dalle diverse linee di volo. Esso prevede che sulle aree di sovrapposizione ad ogni edificio vengano assegnati i valori radiometrici di una singola strisciata, quella per cui la distanza tra il poligono che la rappresenta e la linea di volo è minima.

A differenza della prima fase, in questa gli edifici non sono caratterizzati dalla stesso materiale di copertura, e pertanto per il calcolo della temperatura superficiale corretta si rende necessaria

la correzione per gli effetti dell'emissività; vista la moderata risoluzione spaziale delle immagini (1m) si suppone che i pixels al suolo siano omogenei, e si applica la tecnica dell'Emissivity Modulation (già applicata su immagini satellitari multispettrali) sulle immagini termiche in combinazione con un'ortofoto ricampionata ad 1m.

L'algoritmo di Thermal Urban Road Normalization mira ad eliminare gli effetti delle variazioni microclimatiche sulle immagini considerando alcuni oggetti (in questo caso le strade) come caratteristiche pseudo-invarianti, ovvero con una temperatura costante nelle diverse immagini: viene calcolata la temperatura superficiale corretta delle strade (disponibili da cartografia o estratte mediante GEOBIA) tramite i valori di emissività delle superfici che le compongono e, dopo averne calcolato la temperatura all'interno di un buffer, le singole immagini vengono corrette mediante interpolazione dei valori di deviazione rispetto alla media.

L'architettura del sistema Geoweb di HEAT prevede come prima fase il processing delle immagini (effettuato tramite il software ENVI in linguaggio IDL) con la creazione delle mappe di Temperatura superficiale, le quali vengono poi inserite in un sistema GIS che, tramite un server Web, viene reso accessibile agli utenti della rete. Il sistema è schematizzato il fig. 3.16.

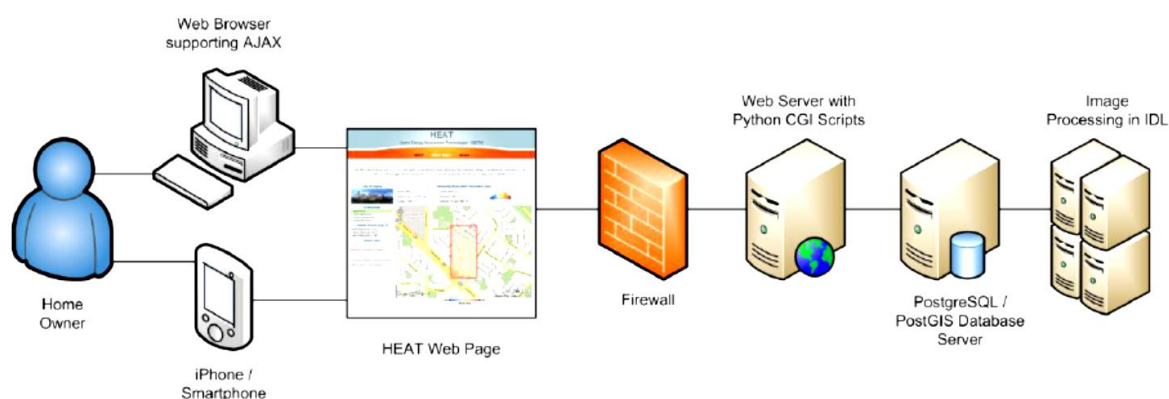


Fig. 3.16 – Architettura del sistema Geoweb di HEAT (da Hay et al.,



2011)

Di notevole interesse è l'interfaccia del sistema Geoweb, che prevede tre livelli di analisi su scala diversa consentendo la visualizzazione simultanea della dispersione termica riferita ad un singolo edificio, ad un quartiere o all'intera città.

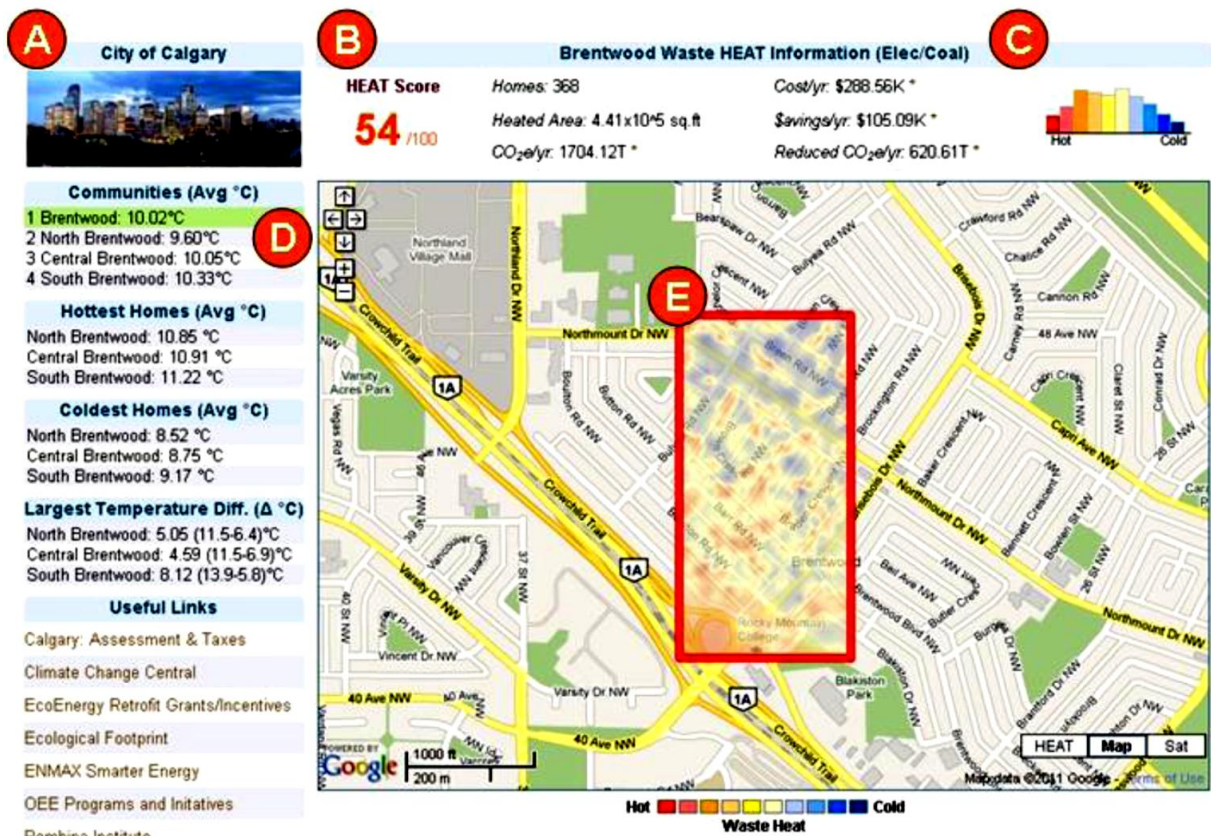


Fig. 3.17 – La Heat Map (da Hay et al., 2011)

La schermata principale è costituita dalla HEAT map (fig. 3.17), che mostra un'immagine interpolata di temperatura superficiale sovrapposta alla cartografia numerica dell'intera città, oltre ad alcuni dati statistici (numero di edifici, area riscaldata totale, temperatura media sull'area), ad una serie di informazioni sull'efficienza energetica degli stessi e sulla produzione di CO<sub>2</sub> per il loro riscaldamento (in base al tipo di combustibile ipotizzato viene calcolato il costo annuo e l'ipotetico risparmio ottenibile in termini di energia necessaria e CO<sub>2</sub> prodotta) e ad un

istogramma che rappresenta la suddivisione degli edifici della città in 10 classi di temperatura. Infine viene calcolato e visualizzato l'HEAT Score, ovvero un punteggio che rappresenta il calore residuo totale prodotto dalla città in questione. il calore residuo totale prodotto dalla città in questione.

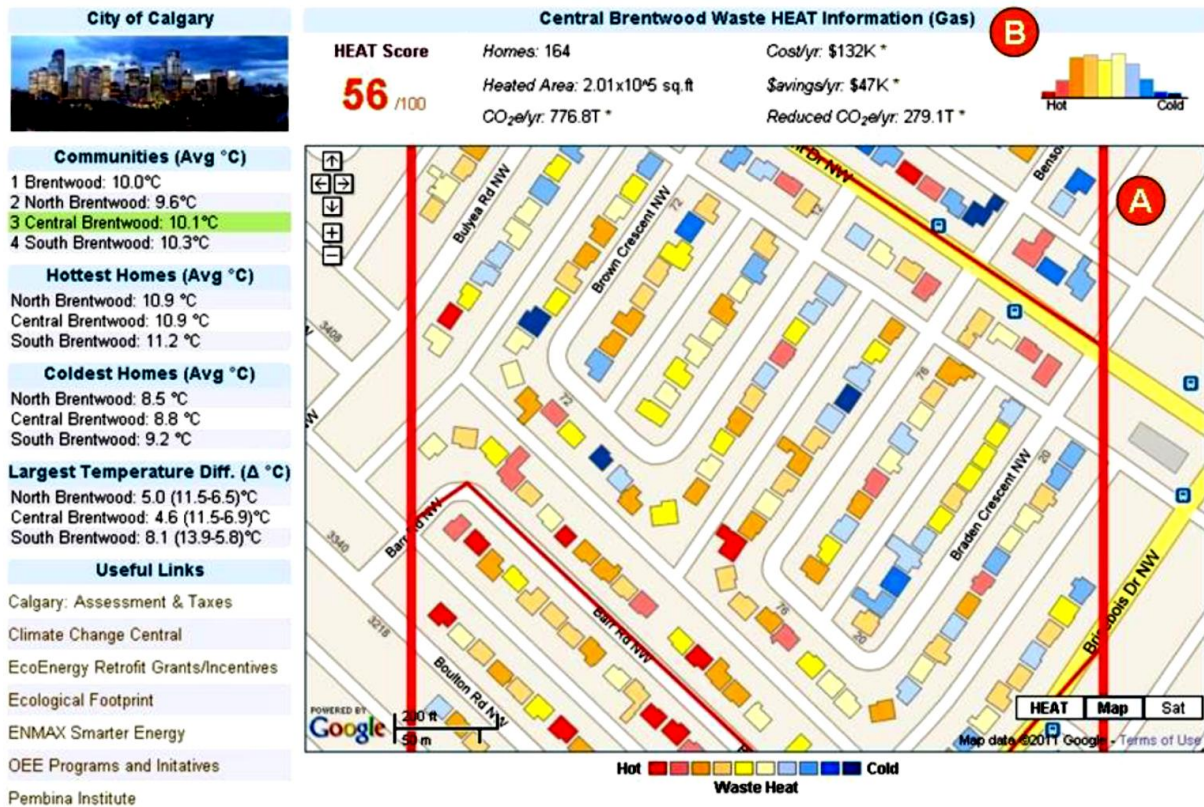


Fig. 3.18 – La Community Heat Map (da Hay et al., 2011)

Dalla HEAT map si accede alla Community Heat Map (fig. 3.18), costituita dalla mappa degli edifici dell'area selezionata suddivisi in 10 classi di temperatura in base alla temperatura superficiale media della copertura. Anche in questa schermata sono disponibili dati statistici sul numero di edifici e sull'area riscaldata, i dati su consumo energetico e produzione di CO<sub>2</sub> e l'Heat Score, riferito questa volta alla comunità selezionata e non all'intera città. Da questa schermata intermedia è possibile selezionare ogni singolo edificio sulla presente sulla mappa, accedendo alla Home HEAT map (fig. 3.19): in questa finestra popup è possibile visualizzare l'immagine termica dell'edificio



selezionato con dei markers che ne evidenziano i punti più caldi (tre al suo interno, tre sul suo perimetro). Scorrendo con il cursore sull'area dell'edificio è possibile visualizzare i valori di temperatura misurati per ogni pixel, mentre cliccando sull'apposita icona si accede all'immagine terrestre dell'edificio tramite Google Street View.



Fig. 3.19 – La Home Heat Map (da Hay et al., 2011)

All'interno della finestra sono disponibili anche i valori massimi e minimi di temperatura, l'HEAT Score dell'edificio selezionato e la fuel table, che informa l'utente sull'energia giornaliera necessaria per il riscaldamento e sulla corrispondente CO<sub>2</sub> prodotta utilizzando i più diffusi tipi di combustibile (gas naturale, carbone fossile, gasolio o fonti rinnovabili).

Dalla finestra popup è possibile accedere anche alla Saving Tab (fig. 3.20), che mostra graficamente i risultati dell'applicazione dell'Annual Home Energy Use Model in termini di energia

richiesta e CO<sub>2</sub> prodotta per i vari mesi dell'anno in base al tipo di combustibile utilizzato.

Hay evidenzia come la geospatial intelligence, ovvero l'utilizzo del Web come strumento per la creazione di piattaforme GeoWeb con diverse funzionalità basate su acquisizione ed elaborazione di immagini digitali offre potenzialità enormi per l'interpretazione visiva ed intuitiva dei dati e per la diffusione su larga scala e a target diversi delle informazioni.

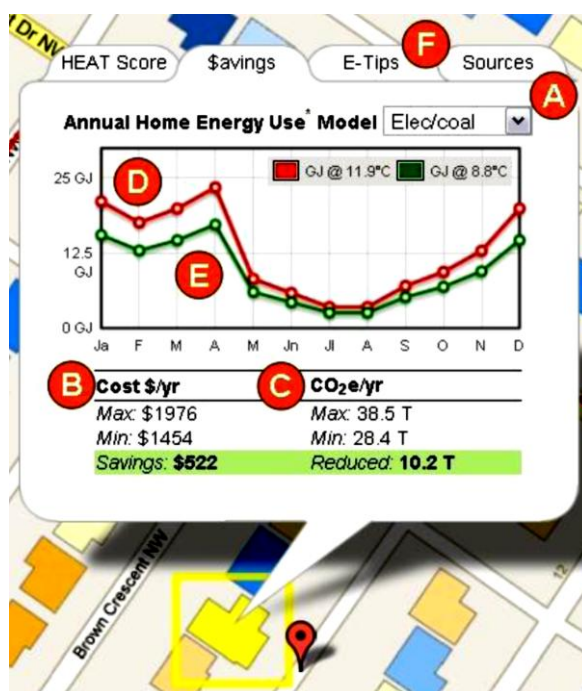


Fig. 3.20 – La \$avings tab (da Hay et al., 2011)

Il progetto HEAT, seppure di grande interesse e sviluppato con notevole cura e competenza, presenta anch'esso alcune semplificazioni inevitabili e rilevanti. Di seguito se ne elencano alcune:

- durante la prima fase, l'analisi è stata effettuata su un numero di edifici limitato e con le medesime caratteristiche strutturali e di copertura (stesso periodo di costruzione, copertura in asfalto) per cui è stato assegnato un valore di emissività costante a tutti gli oggetti al suolo (0,91);
- l'*Annual Home Energy Use Model* ipotizza, nel calcolo

dell'energia e della CO<sub>2</sub> che è possibile risparmiare, che si attuino delle misure di efficienza energetica che comportino una variazione della temperatura superficiale della copertura sino a raggiungere un valore costante pari al minimo riscontrato sul tetto considerato. Questo di basa sull'assunto che, essendo stato raggiunto un valore costante su almeno uno dei punti del tetto, sia ragionevole ipotizzare che esso venga raggiunto anche sul resto della copertura in esame;

- la tecnica dell'Emissivity Modulation, utilizzata per la correzione dell'emissività nella fase II, è stata sviluppata per l'utilizzo su immagini multispettrali a media risoluzione (su immagini VNIR e TIR ASTER, con una risoluzione rispettivamente di 15 e 90 m) e la sua applicabilità su datasets ad una risoluzione spaziale più elevata non è stata ancora analizzata nel dettaglio;
- come evidenziato anche dagli autori, la formulazione dell'HEAT Score comporta che a valori elevati siano associate elevate dispersioni di calore, impedendone un'interpretazione intuitiva da parte degli utenti finali (la soluzione proposta è il calcolo di un altro indice, il Carbon Score).

#### **4. Il calcolo della temperatura superficiale delle coperture edilizie tramite termografia aerea**

Come già evidenziato nel capitolo precedente, le applicazioni termografiche finalizzate alla valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici tramite sensori infrarossi aerei sono oggetto di crescente interesse da parte della comunità scientifica, principalmente a causa delle prestazioni odierne offerte dai sensori e del potenziale scientifico e commerciale che tali applicazioni offrono, in particolare in combinazione con sistemi GIS di analisi spaziale dei dati.

In particolare, i sistemi di supporto spaziale delle decisioni (Spatial Decision Support System, SDSS) finalizzati all'aumento dell'efficienza energetica degli edifici necessitano per poter essere efficaci di mappe di temperatura sinottiche e con caratteristiche adeguate: la termografia aerea consente l'acquisizione di aree vaste con costi relativamente contenuti e l'applicazione di tecniche rigorose e consolidate permette di ottenere misure sufficientemente accurate e ripetibili.

Questi SDSS hanno diverse tipologie di stakeholders (Hay et al., 2011):

- proprietari di casa e affittuari che possono valutare lo stato dei propri immobili;
- imprenditori nei campi dell'adeguamento e certificazione energetica che possono individuare le aree potenzialmente più bisognose d'intervento;
- i fornitori di servizi energetici;
- le imprese di costruzione che possono verificare la qualità dei propri edifici;
- agenti immobiliari che possono promuovere le prestazioni ambientali degli immobili;

- enti territoriali e municipalità che intendono monitorare o incrementare l'efficienza energetica degli edifici nelle aree di propria competenza;
- urbanisti e pianificatori che mirano a stabilire le aree prioritarie di intervento per recuperi o ristrutturazioni edilizie;
- privati cittadini che possono valutare intuitivamente le prestazioni ambientali degli edifici della propria comunità.
- agenzie governative che possono identificare eventuali costruzioni abusive o irregolari.

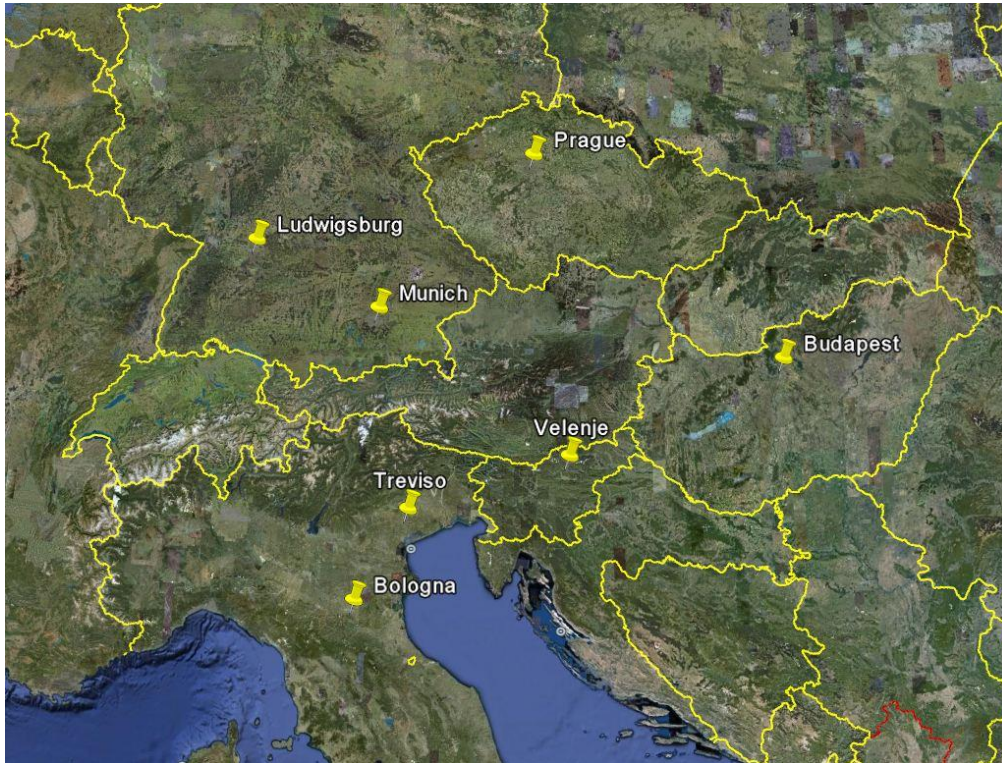
La stima della temperatura superficiale dei tetti da immagini termiche è complicata dalle caratteristiche fisiche dei materiali (principalmente l'emissività), dall'interferenza della radiazione con l'atmosfera circostante e dalla topografia della scena. La valutazione di spessore e tipologia d'isolamento è resa ulteriormente difficoltosa dall'assenza di informazioni sulla ventilazione del tetto e dal bilancio energetico sulla copertura.

Oltre agli errori nella stima della temperatura superficiale, un ulteriore degrado dell'accuratezza è dovuto appunto all'incertezza nella rilevante mole di dati aggiuntivi che concorrono a stabilire i diversi fattori del bilancio energetico (Allison, 2007).

Questo capitolo tratta del rilievo e della sperimentazione effettuata su immagini termiche acquisite da piattaforma aerea nell'ambito del progetto europeo *Energycity: Reducing energy consumption and CO2 emissions in cities across Central Europe*.



#### 4.1 Il progetto Central Europe Energycity



*Fig. 4.1 – Città interessate dal progetto Energycity*

Il progetto (<http://www.energycity2013.eu/>), partito nel febbraio 2010 e finanziato dal fondo Central Europe della CE, prevede la partecipazione di 10 partners appartenenti a 5 diversi paesi dell'Europa Centrale:

- Budapest University of Technology and Economics - Department of Environmental Economics (lead partner del progetto);
- City of Ludwigsburg;
- City of Munich - Department of Health and Environment
- Prague 11 Metropolitan District;
- CEV – Consorzio Energia Veneto;
- Comune di Bologna - Settore Ambiente e Verde Urbano;



- Alma Mater Studiorum Università di Bologna – Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e dei Materiali;
- OGS – Istituto Nazionale di Oceanografia e Geofisica Sperimentale;
- CERRE – Center for Excellence for Renewable Energy, Energy Efficiency and Environment;
- KSSENA – Energy Agency of Savinjska, Saleska and Koroska Region.

Le città interessate dal rilievo (*fig. 4.1*) sono Bologna e Treviso in Italia, Budapest in Ungheria, Praga in Repubblica Ceca, Monaco di Baviera e Ludwigsburg in Germania, e Velenje in Slovenia: su queste città è prevista l'acquisizione di diversi datasets digitali al fine di creare un sistema WebGis multicriteria di supporto spaziale alle decisioni.

Le attività del progetto, suddivise in Work Packages, sono finalizzate a:

- creare una base di conoscenza comune e coordinata sulle tematiche energetiche tra i diversi paesi;
- acquisire diversi set di dati digitali (immagini aeree termiche ed iperspettrali, immagini satellitari) sulle aree di test delle diverse città per la valutazione della temperatura superficiale delle coperture e la creazione di mappe di “heat loss”;
- sviluppare un sistema SDSS web-based per la valutazione delle caratteristiche energetiche degli edifici e la riduzione dei consumi energetici e della produzione di CO<sub>2</sub>;
- effettuare una serie di azioni pilota, come workshop sul Carbon Mapping, campagne di sensibilizzazione dei cittadini sulle tematiche energetiche trattate, e piani di riduzione della “fuel poverty”;

- definire una strategia transnazionale comune e redigere un documento di guida politica da sottoporre alla comunità europea e alle amministrazioni nazionali e locali.

Inizialmente è stata consultata parte della letteratura disponibile sui temi della mappatura energetica da termografia aerea, della misura dell'emissione di CO<sub>2</sub> in area urbana, sull'uso di immagini digitali multi e iperspettrali per la classificazione di materiali di copertura; è stato anche preparato un glossario in lingua inglese, contenente circa 600 voci relative al remote sensing, alla termografia e alla fotogrammetria aerea ([http://www.energycity2013.eu/media/Documents%20Centre/WP3/EnergyCity\\_glossary.html](http://www.energycity2013.eu/media/Documents%20Centre/WP3/EnergyCity_glossary.html)), che possa essere utilizzato dai diversi partner stranieri per comprendere e utilizzare correttamente i termini specifici riguardanti le attività del progetto.

## 4.2 I rilievi aerei e terrestri: strumenti e modalità operative

La parte di maggior interesse scientifico è di certo il processing, sulle aree di test delle sette città interessate, di alcuni datasets digitali acquisiti tramite differenti tipi di rilievo (sia terrestre che da piattaforma aerea) e di strumenti (termocamere aeree e terrestri, ricevitori GNSS, dispositivi di misura delle proprietà atmosferiche). Tra essi quello che riguarda maggiormente le tematiche trattate nella tesi è sicuramente il rilievo termografico aereo ad alta risoluzione, tramite il quale verranno create le mappe termiche delle diverse aree urbane da implementare nel sistema spaziale di supporto delle decisioni.

I rilievi termografici aerei sono effettuati dall'Istituto di Oceanografia e Geofisica Sperimentale (OGS) di Trieste tramite sensore NEC TS9260 (*fig. 4.2*) installato su piattaforma aerea. Di seguito sono elencate le specifiche nominali del sensore:

- banda d'acquisizione: 8 – 14  $\mu\text{m}$
- sensore termico: microboleometro 640 x 480 pixels
- risoluzione radiometrica: 14 bit
- accuratezza:  $\pm 2^\circ\text{C}$  or  $\pm 2\%$  della lettura
- Field of View (FOV):  $21,7^\circ \times 16,4^\circ$
- Frame rate massimo: 60 immagini/secondo
- Instantaneous field of view (IFOV): 0,6 mrad
- NETD : 0,08  $^\circ\text{C}$  (a 30  $^\circ\text{C}$ )



*Fig. 4.2 - Termocamera NEC TS9260*

L'esecuzione corretta di un rilievo termico aereo dipende da diversi fattori, tra cui condizioni metereologiche adeguate ed accurata pianificazione del rilievo. Per eseguire i voli termici l'OGS e il DICAM hanno monitorato continuamente le condizioni meteo nelle città interessate dal rilievo durante gli inverni del 2010 e del 2011, cercando per quanto possibile di eseguire i rilievi in condizioni ottimali, ovvero:

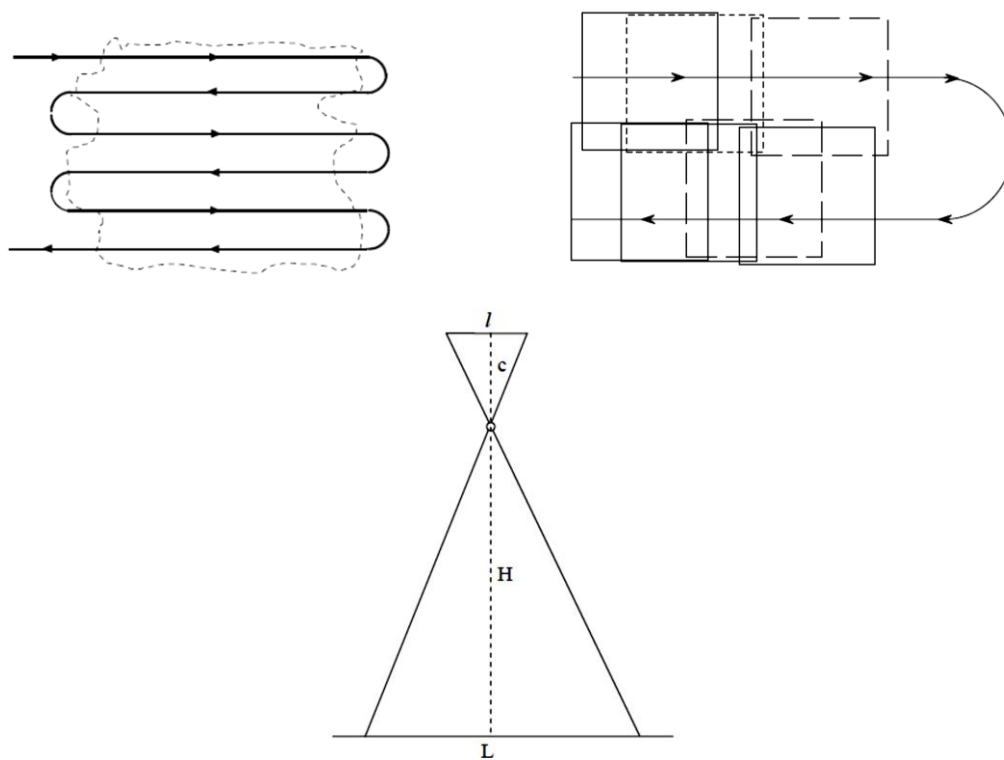
- durante la notte, in modo da evitare gli effetti della radiazione solare riflessa (sia diretta che diffusa) e l'effetto differenziale di riscaldamento delle superfici per irraggiamento;
- con bassa o nulla copertura nuvolosa;
- con vento debole, sia per quanto riguarda la turbolenza in quota (che provoca oscillazioni dell'aereo durante l'acquisizione) che a terra (in quanto influenza gli scambi di calore per convezione delle superfici);
- con temperatura atmosferica piuttosto bassa, comunque inferiore ai 10°C al momento del rilievo, in modo da massimizzare le differenze di temperatura tra l'interno riscaldato degli edifici e l'esterno esposto all'atmosfera e quindi il contrasto sulle scene;
- in giorni lavorativi, in modo da massimizzare il numero di edifici riscaldati.

Per la corretta pianificazione del rilievo è stato anche necessario definire con criterio le modalità di rilievo, ovvero:

- calcolare la traiettoria da seguire e la velocità da mantenere in base alla frequenza di acquisizione delle scene (2") all'altezza di volo, all'impronta a terra di ogni scena e al necessario ricoprimento longitudinale e trasversale tra fotogrammi e strisciate;

- effettuare prese nadirali o quasi nadirali, in modo da minimizzare gli effetti direzionali dell'emissività e delle ombre (considerato il campo di vista della camera infrarossa aerea l'inclinazione massima in presa nadirale è di  $10,75^\circ$ ).

Considerando una presa nadirale su una superficie piana, si può considerare lo schema di fig. 4.3.



*Fig. 4.3 – Acquisizione nadirale dei fotogrammi*

L'altezza di volo  $H$  viene calcolata in base alla lunghezza focale  $c$  della camera, e al fattore di scala ( $s=l/L$ ) in base alla similarità tra triangoli, risolvendo l'eguaglianza:

$$\frac{c}{H} = \frac{l}{L} = s$$

$$H = c * s$$

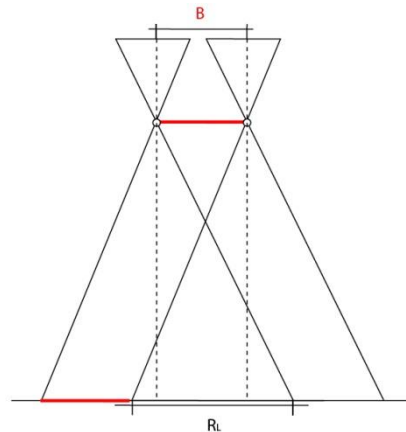
La base, ovvero la distanza tra 2 centri di presa successivi, è stata calcolata in base al fattore di ricoprimento longitudinale  $\mu$  (per cui è stato utilizzato il valore del 60%) tra i fotogrammi secondo lo schema di fig. 4.4, seguendo la relazione:

$$B = L - \mu * L = L * (1 - \mu)$$

$$R_L = \mu * L$$

La velocità di volo  $u$  (m/s) viene calcolata una volta note la base in m e i secondi intercorrenti tra 2 scatti successivi secondo la relazione

$$u = B/t$$



*Fig. 4.4 – Calcolo della base tra due fotogrammi*

La distanza tra 2 strisciate successive  $I$ , in maniera analoga al calcolo della base, deriva dallo schema di fig. 4.5 utilizzando però il fattore di ricoprimento trasversale  $\phi$  tra le strisciate (per cui è stato scelto il valore del 20%) secondo la relazione:

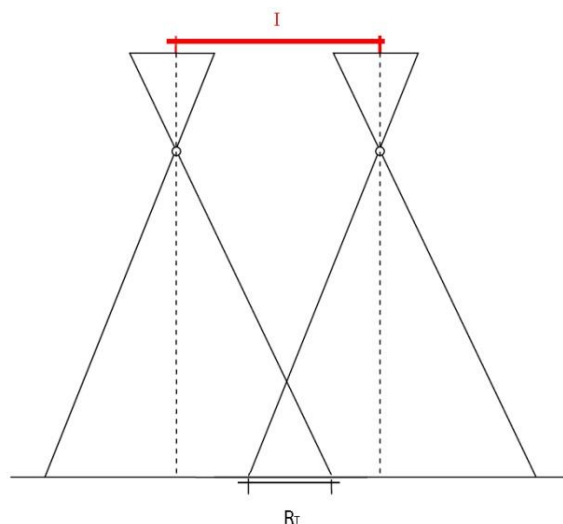
$$I = L - \phi * L = L * (1 - \phi)$$

$$R_T = \phi * L$$

Imponendo come parametri la lunghezza focale della camera NEC TS 9260, una risoluzione spaziale a terra di 50 cm, una frequenza di acquisizione di 30 frame al minuto, e i fattori di ricoprimento longitudinale e trasversale pari rispettivamente al 60% e al 20%, è stata calcolata un'altezza di volo di 850 m e una velocità di volo di circa 110 nodi (circa 200 Km/ora): naturalmente questi sono valori di riferimento in quanto non è possibile mantenere perfettamente costanti durante l'acquisizione la quota e la velocità.

Sulle sette città interessate dal progetto sono stati effettuati da

parte dell'OGS anche dei rilievi aerei iperspettrali, finalizzati ad ottenere informazioni sulle caratteristiche fisiche dei materiali di copertura e quindi all'assegnazione dell'emissività da utilizzare nel sensor model per il calcolo della temperatura superficiale effettiva.



*Fig. 4.5 - Calcolo della distanza tra le strisciate*

I voli sono stati effettuati durante il giorno, separatamente dai rilievi termici, in quanto per il processing delle immagini iperspettrali finalizzati alla classificazione dei materiali di copertura vengono utilizzate le caratteristiche di riflettanza dei pixel della scena, ed è perciò assolutamente necessario il contributo dell'irradiazione solare diurna. Nonostante le condizioni meteo nelle date dei rilievi termici fossero comunque di cielo sereno o poco nuvoloso e fosse quindi teoricamente possibile acquisire entrambi i datasets nelle stesse date, ciò non è stato possibile in quanto il velivolo utilizzato dall'OGS era il medesimo, e non era temporalmente possibile procedere nella stessa giornata alla disinstallazione della camera termica e all'installazione di quella iperspettrale sulla piattaforma anche in considerazione della localizzazione della distanza degli aeroporti di partenza rispetto ai siti rilevati.

Il sensore iperspettrale utilizzato per l'acquisizione è l'AISA

EAGLE 1K (*fig. 4.6*), le cui specifiche tecniche sono elencate di seguito:

- sensore: pushbroom di dimensione 1024 pixels.
- range spettrale: 400-970 nm
- risoluzione spettrale: fino a 252 bande
- risoluzione radiometrica: 12 bit
- FOV :29.9°
- IFOV :0.029°
- profondità di swath: 0.53\*altezza di volo
- Sensore push-broom (1024 pixels)
- Range 400-940 nm (V-NIR)



*Fig. 4.6 - Sensore iperspettrale AISA Eagle 1K*

Le immagini iperspettrali sono state acquisite in modo da avere una risoluzione spaziale al suolo di 75 cm: considerato l'IFOV del sensore pushbroom, è stata calcolata un'altezza di volo di circa 1250 m ed una velocità della piattaforma di 110 nodi.

E' da evidenziare come, nonostante la camera iperspettrale consenta di acquisire fino a 252 bande, si sia deciso di comune accordo con l'OGS di impostare il numero di bande spettrali a 64,



in modo da limitare notevolmente la rilevante mole di dati digitali (comprendente anche cartografie digitali, immagini termiche, registrazioni GNSS, immagini satellitari) che viene acquisita e processata per ognuna delle sette città senza compromettere eccessivamente la quantità di informazione delle immagini rilevate. Si consideri che per memorizzare una singola strisciata del sensore iperspettrale lunga circa 4,3 Km con 64 bande spettrali è necessario circa 1GigaByte di spazio su hard disk. E' da notare anche come la camera iperspettrale utilizzata acquisisca le bande nella regione del VNIR (Visible-Near InfraRed), in un range spettrale differente da quello della camera termica.

Oltre all'acquisizione di dati digitali da piattaforma aerea il Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e dei Materiali (DICAM) dell'Università di Bologna ha provveduto, tramite un team coordinato dal Prof. Gabriele Bitelli, ad effettuare, contemporaneamente ai rilievi termici aerei, delle campagne di rilievo terrestre finalizzate all'acquisizione di immagini termiche terrestri su alcuni target contenuti all'interno delle aree di test e alla collezione di una serie di misure da utilizzare come parametri di input nelle successive operazioni di processing delle immagini.

La camera termica terrestre utilizzata è una FLIR P620 (*fig. 4.7*), di proprietà del Dipartimento, con le seguenti specifiche tecniche:

- Sensore termico: microboleometro da  $640 \times 480$  pixels
- Range spettrale : 7,5 - 13  $\mu\text{m}$
- NETD: <40 mK (a +30°C)
- Risoluzione radiometrica: 14 bit
- Frequenza di campionamento immagini: 30 Hz
- Field of View : 24° x 18°

- Istantaneous field of view: 0,65 mrad
- Lunghezza focale: 38 mm
- Accuracy:  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  or  $\pm 2\%$  della lettura

Oltre alla camera termica, per i rilievi terrestri sono stati utilizzati anche altri strumenti:

- un ricevitore GNSS Ashtech ProMark 500 (L1 + L2 – GPS + GLONASS) per il rilievo della posizione dei punti a terra.
- dei dataloggers EXTECH TH10 per la misura di temperatura atmosferica e umidità relativa (con accuratezza dichiarata rispettivamente di  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  e di  $\pm 3\%$ );
- un dispositivo multifunzione DeltaOHM DO9847, equipaggiato con tre sonde per la misura di parametri fisici: TP49AC per la misura di temperatura per contatto (con accuratezza dichiarata di  $\pm 0,25^{\circ}\text{C}$ ), HP472ACR per la misura di temperatura dell'aria e umidità relativa (con accuratezze dichiarate rispettivamente di  $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$  e  $\pm 1,5\%$  e PP472 per la misura della pressione atmosferica (con accuratezza dichiarata di  $\pm 0,3$  mbar a  $20^{\circ}\text{C}$ ).



*Fig. 4.7 - Termocamera FLIR P620*

Un aspetto importante del rilievo terrestre è la localizzazione dei ground points su cui effettuare le misure. Per ogni città sono stati preventivamente ipotizzati, tramite analisi visiva dell'area con la

modalità street-view di Google Earth, una decina di punti che soddisfacessero una serie di criteri di scelta, ovvero:

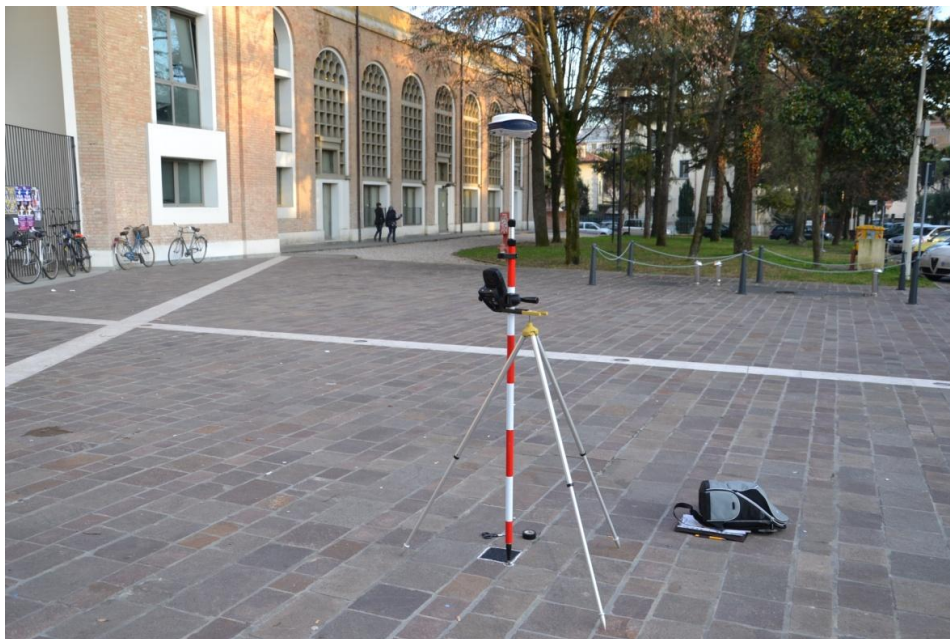
- in aree pianeggianti e orizzontali (per minimizzare gli effetti direzionali) facilmente individuabili sulle immagini termiche;
- in aree aperte circondate da edifici non troppo alti (in modo da rilevare la posizione GPS in condizioni ottimali);
- su diversi tipi di pavimentazioni lisce, omogenee (su cui poter applicare il nastro ad alta emissività) e dello stesso colore;
- in luoghi pubblici e facilmente accessibili in auto (per velocizzare le operazioni di rilievo);
- in zone senza eccessivo affollamento (per evitare l'asportazione del nastro nell'intervallo tra le due fasi del rilievo);
- in maniera quanto più possibile distribuita sull'area di test.

Il rilievo terrestre si articola in due fasi. La prima fase, nel pomeriggio precedente il volo termografico notturno, prevede l'applicazione di nastro adesivo nero ad alta emissività sui targets selezionati (*fig. 4.8*), per consentire loro di raggiungere l'equilibrio termico con la superficie sottostante prima che si svolga il rilievo termico. Inoltre, tramite il ricevitore GNSS in doppia frequenza già citato, vengono registrate per un periodo di circa sette minuti le osservazioni GNSS su ogni punto prescelto (*fig. 4.8*), le quali verranno utilizzate in combinazione con le osservazioni della stazione permanente in prossimità dell'area di test per il calcolo in post-processing della posizione delle ground truth.

Infine, per registrare le variazioni temporali delle caratteristiche atmosferiche durante il rilievo aereo in questa fase vengono posizionati anche due dataloggers EXTECH TH10 (*figg. 4.9 e*

4.10), uno ad un'altezza di misura standard (2 m) e l'altro infisso nel terreno di un'area verde nell'area di test; i dispositivi vengono impostati per registrare i valori di temperatura dell'aria e umidità ad intervalli regolari di 5”.

La seconda fase del rilievo si svolge simultaneamente all'acquisizione delle immagini termiche aeree, e prevede l'utilizzo della camera infrarossa per la misura della temperatura superficiale apparente dei target tramite la procedura “non-contact” descritta dalla ASTM E 1933-99a, che permette di correggere le immagini per gli effetti della temperatura di background riflessa, dell'emissività del materiale e delle proprietà atmosferiche.



*Fig. 4.8.- Rilievo della posizione dei targets*

Il modello utilizzato dalla camera termica per il calcolo della temperature degli oggetti della scena  $T_{obj}$  è illustrato in fig. 4.11, e si basa sull'equazione

$$W_{tot} = \varepsilon * \tau * W_{obj} + 1 - \varepsilon * \tau * W_{refl} + 1 - \tau * W_{atm}$$

dove  $W_{tot}$ ,  $W_{obj}$ ,  $W_{refl}$ ,  $W_{atm}$  sono le potenze radianti rispettivamente rilevate dal sensore, emesse dall'oggetto, emesse dal surrounding

ed emesse dall'atmosfera.



*Figg. 4.9 e 4.10.- Posizionamento dei 2 datalogges (a) a 2m (b) al suolo*

Il modello di correzione interno, che è stato sviluppato per applicazioni termografiche nel campo dell'edilizia, risulta adeguato per rilievi terrestri con distanze di presa sufficientemente piccole (nell'ordine di alcune decine di m) mentre non può essere utilizzato per la correzione delle immagini aeree, a causa dell'approssimativa parametrizzazione degli effetti atmosferici. L'applicazione del modello richiede quali parametri di input:

- la temperature atmosferica  $T_{atm}$ ;
- l'umidità relativa dell'aria;
- la temperatura riflessa apparente  $T_{refl}$ , proveniente dagli oggetti intorno al punto e dall'atmosfera, stimata empiricamente come descritto in seguito;
- l'emissività della superficie  $\epsilon$ , che viene anch'essa stimata in situ.

Nel dettaglio la procedura seguita è la seguente:

- la termocamera viene installata sul treppiede e configurata per una presa quasi nadirale (analoga alla presa della camera aerea) cercando di limitare gli effetti di riflessione dovuti ad oggetti ed edifici attorno ai target;

tramite psicrometro vengono misurate la temperatura di bulbo secco dell'aria e l'umidità relativa, utilizzando uno dei moduli

sonda a disposizione (per i rilievi in cui sono stati utilizzati i dataloggers TH10, le informazioni vengono registrate ed utilizzate in post processing per la correzione delle immagini);

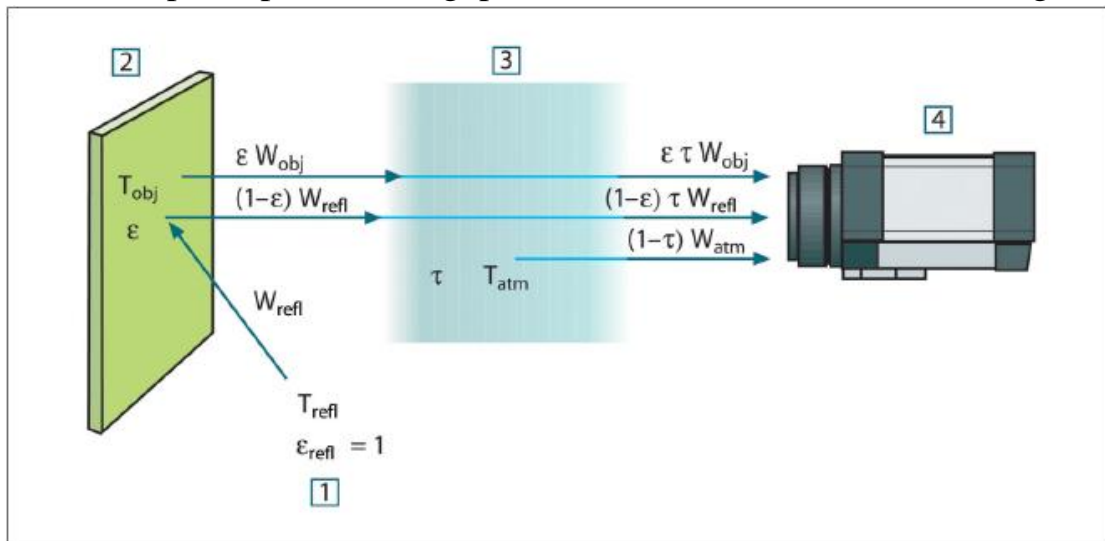
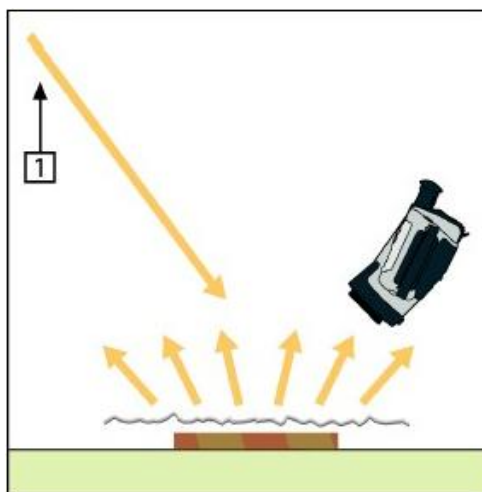


Fig. 4.11 – Sensor model utilizzato dalla camera FLIR P620

- le grandezze appena misurate vengono inserite come parametri di input nella termocamera (oltre alla distanza di presa), con cui viene quindi stimata la temperatura apparente riflessa (fig. 4.12) tramite un riflettore di Lambert approssimato, realizzato con dei fogli di alluminio accartocciati e successivamente ridistesi su un supporto rigido. Come temperatura riflessa viene utilizzata la media all'interno di un rettangolo sufficientemente ampio sull'immagine (fig. 4.13);
- una volta impostata la temperatura riflessa, viene stimata l'emissività della superficie tramite metodo empirico, ipotizzando che il nastro abbia emissività nota e si trovi alla medesima temperatura della superficie. Viene misurata la temperatura del nastro dopo averne impostata l'emissività, che viene cambiata iterativamente sinché la temperatura della superficie non raggiunge la stessa temperatura precedentemente misurata.

- è quindi sufficiente inserire il valore stimato di emissività per misurare la temperatura superficiale apparente del target come media all'interno di un'area rettangolare di dimensioni adeguate (*fig. 4.14*).

Nelle campagne di rilievo per cui è stato utilizzato il dispositivo multifunzione DeltaOHM per la misura della temperatura atmosferica e dell'umidità relativa, è stato possibile misurare anche la temperatura superficiale della pavimentazione tramite la sonda di temperatura a contatto (con un'accuratezza dichiarata di  $\pm 0,25^{\circ}\text{C}$ ) e la pressione atmosferica (da inserire come dato di input nell'applicazione del MODTRAN).

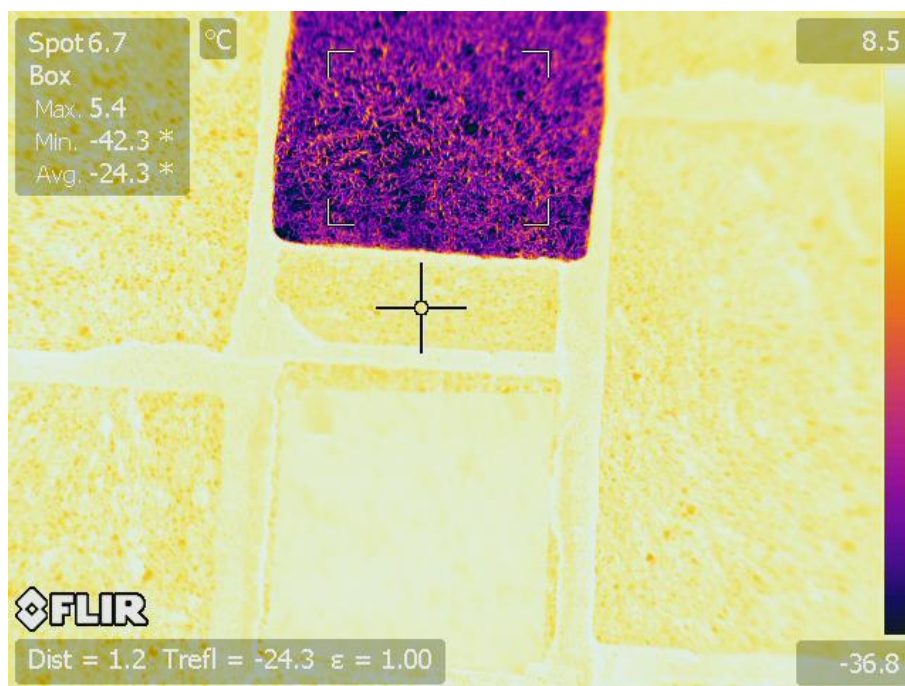


*Fig. 4.12 – Procedura per la stima della temperatura apparente riflessa (da FLIR)*

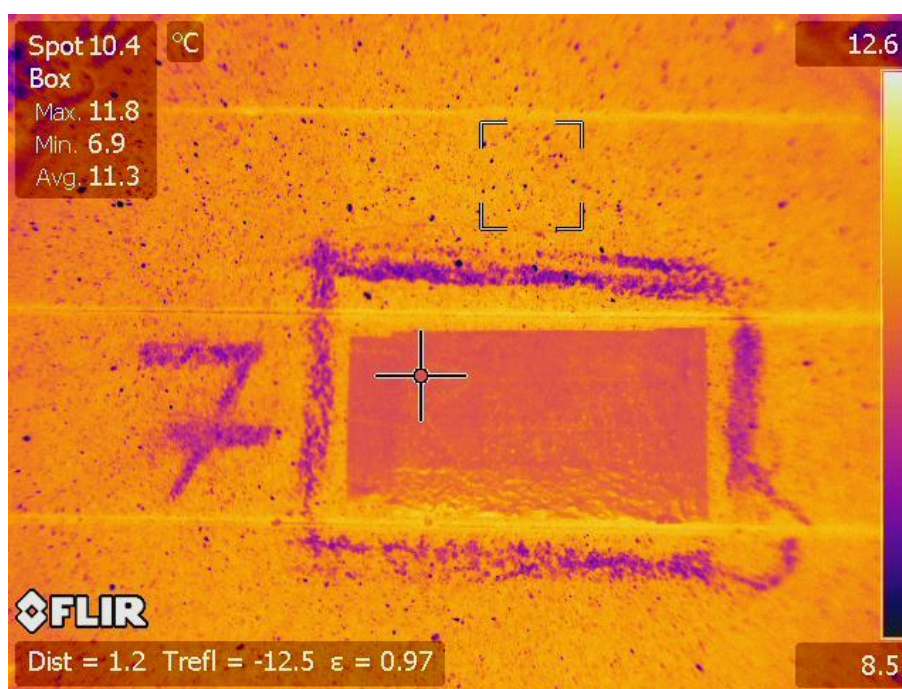
Nell'eseguire le misure di temperatura superficiale è importante tenere conto della scala operativa: in realtà i pavimenti non sono totalmente omogenei, e sono composti da differenti materiali e tessiture, per cui la temperatura superficiale misurata dipende, oltre che dai fattori sopra citati, dall'ampiezza dell'area su cui si esegue la stima dell'emissività e il calcolo della temperatura media. Per tener conto dell'anisotropia spaziale e poter confrontare i risultati ottenuti tramite termografia terrestre con i valori di temperatura calcolati dalle immagini termiche a seguito



delle correzioni radiometriche e di emissività, la misura deve riferirsi ad un'area di dimensioni comparabili con quelle dei pixels dell'immagine termica ( $\cong 50$  cm), ovvero della Ground Sampling Distance.



*Fig. 4.13 – Stima della temperatura apparente riflessa come media all'interno di un poligono rettangolare*



*Fig. 4.14 – Misura della T superficiale su un poligono rettangolare*



Per ogni punto su cui sono state eseguite le misure terrestri è stata prodotta una monografia che riporta:

- la posizione del punto con una didascalia descrittiva per la sua identificazione;
- le coordinate calcolate in postprocessing tramite il software GNSS Solutions della Ashtec (<http://www.ashtech.com/gnss-solutions-3935.kjsp>), in diversi sistemi di riferimento (coordinate geografiche con datum WGS84, coordinate cartografiche UTM con datum WGS84 ed ED50);
- le caratteristiche della superficie, l'ora esatta della misura e la strumentazione utilizzata;
- i valori misurati di temperatura atmosferica e umidità relativa;
- i valori stimati di temperatura apparente riflessa, di temperatura del nastro, di emissività della superficie;
- il valore di temperatura superficiale apparente misurato;
- una serie di immagini (identificazione del punto su Google Earth, fotografie della posizione del punto e del tipo di superficie, immagini termiche utilizzate per la misura di  $T_{refl}$  e di  $T_{obj}$ ).



Oltre alle monografie è stato anche preparato un catalogo delle differenti pavimentazioni oggetto di misura durante i rilievi (tab. 4.1), nel tentativo di armonizzare i dati raccolti sulle diverse città e di valutare le variazioni nei valori di emissività stimati di volta in volta sullo stesso tipo di superficie: il catalogo è tuttora in fase di aggiornamento, in quanto non sono ancora stati completati tutti i rilievi e in futuro potranno essere aggiunte altri materiali o pavimentazioni.









L'esecuzione dei rilievi terrestri è finalizzata a:

- collezionare misure georiferite di temperatura superficiale di per alcuni target a terra (circa 10 per ogni città) mediante la

procedura “non-contact” standard citata nel capitolo 3, da usare come ground truth per valutare l’accuratezza delle correzioni atmosferiche (e in generale di tutto l’algoritmo di processing) sulle immagini termiche aeree. La misura di temperatura da terra è molto meno influenzata dall’atmosfera a causa della breve distanza tra target e sensore (< 1,5 m), e tramite la procedura utilizzata è anche possibile raccogliere informazioni sul tipo di materiale (da utilizzare eventualmente a valle del processo di classificazione delle coperture al suolo dalle immagini iperspettrali).

- stimare i valori di emissività effettiva (nella banda d’acquisizione del sensore termico) per alcune pavimentazioni esterne, da utilizzare come valori di riferimento nel calcolo della temperatura superficiale dalla ground radiance;
- raccogliere osservazioni dirette delle condizioni microclimatiche all’epoca del rilievo, da utilizzare per la parametrizzazione dello strato superficiale dell’atmosfera (*boundary layer*) a contatto col suolo nell’applicazione del codice di trasferimento radiativo. I dati raccolti possono anche essere implementati nel sistema SDSS per essere poi utilizzati come parametri del modello energetico sviluppato dalla BME.

Pavimento		N° di punti rilevati				$\epsilon_{media}$
Tipo	Foto.	Treviso	Velenje	Bologna	Munich	
Type 1		1	3	2	3	0,97
Type 2			3		3	0,95

Type 3				1		0,93
Type 4		3		2	2	0,91
Type 6		1			3	0,96
Type 7				1		0,96
Type 8		1	1	2		0,96
Type 9		1	1	1	1	0,93
Type 11		3		1		0,95
Type 12		1			1	0,96

*Tab. 4.1 – Differenti tipi di pavimentazione e del valore medio di emissività*

L'operazione di georeferenziazione delle misure è di notevole importanza: il calcolo delle coordinate dei target con elevata accuratezza permette di identificare gli stessi punti sugli ortomosaici termici o su ogni altra mappa, sia essa raster o vettoriale, che verrà implementata nel sistema WebGis. La fig. 4.15 mostra la posizione planimetrica (nel sistema UTM/WGS84, zona 32N) di tutti i punti rilevati a terra e della stazione permanente utilizzata nel caso del rilievo termico aereo su Bologna del 7 Marzo 2011, ognuno con l'incertezza ad esso associata.

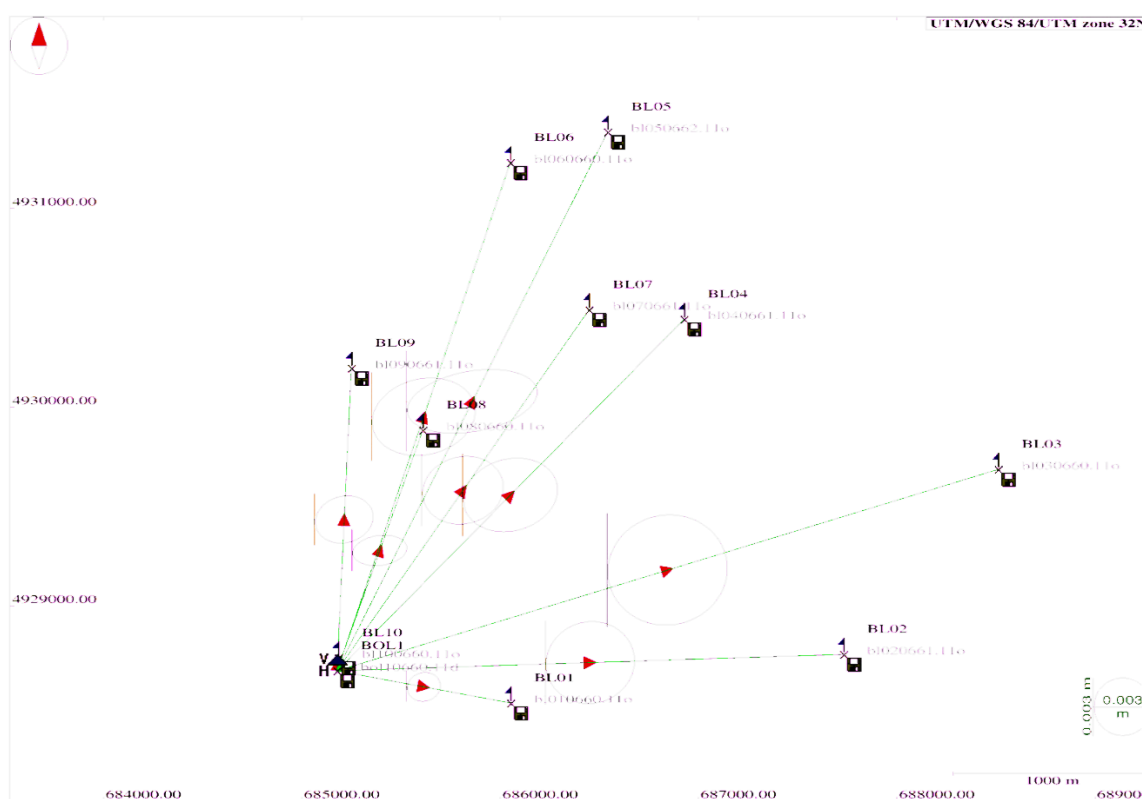
Nonostante gli sforzi dell'OGS e del DICAM per l'accurata

pianificazione di tutti i rilievi previsti dal progetto e delle relative modalità operative, durante il WP4 è stato necessario affrontare alcuni ostacoli, prevalentemente di tipo meteorologico per i rilievi aerei e logistico per quelli terrestri, che si sono presentati. Le principali difficoltà alla corretta esecuzione dei rilievi sono state:

- la necessità di prevedere condizioni meteo adeguate al rilievo con attendibilità e con sufficiente preavviso da poter organizzare il volo aereo e, soprattutto, il trasferimento e la fase di rilievo pre-volo del team per i rilievi terrestri; oltre alle condizioni già citate di cielo sereno, vento debole, basse temperature e assenza di neve, ghiaccio o rugiada sulle coperture, si ricorda che i rilievi termografici aerei vanno eseguiti possibilmente nei giorni feriali e che l'aereo deve percorrere in condizioni di sicurezza anche il tragitto tra l'aeroporto di partenza e l'area di test.
- Durante gli inverni del 2010 e del 2011 sono stati monitorati continuamente diversi siti web di previsione meteorologica, alcuni segnalati dagli stessi partners esteri, al fine di programmare con sufficiente anticipo (2-3 gg) le date di esecuzione dei rilievi; nonostante ciò, in alcuni casi il rilievo è stato annullato a causa delle condizioni meteorologiche non idonee.
- la richiesta di tutte le autorizzazioni necessarie e la verifica delle restrizioni locali o nazionali (es. altezza minima di volo consentita);
- alcune difficoltà iniziali nell'installazione della termocamera aerea sulla piattaforma aerea, e nella configurazione dei diversi componenti;
- alcuni problemi meccanici alla piattaforma aerea, che hanno richiesto operazioni di manutenzione ordinaria e

straordinaria e hanno impedito per alcune settimane l'esecuzione dei voli;

- l'interferenza dei voli con le attività degli aeroporti locali e nazionali prossimi alle aree di test, che hanno costretto l'aereo a effettuare delle traiettorie diverse da quelle previste o a prolungare il rilievo oltre gli orari pianificati (si veda ad esempio la fig. 4.16 che rappresenta la traccia della traiettoria seguita dall'aereo per il rilievo su Bologna).
- la necessità di effettuare i rilievi aerei con rapidità e su punti quanto più possibile distribuiti sull'area, per ottenere misure distribuite e simultanee al rilievo aereo; ciò ha limitato notevolmente il numero di punti che è stato possibile misurare, e ha impedito il posizionamento di target in corrispondenza di coperture edilizie, seppur accessibili.



*Fig. 4.15 – Posizione dei ground truth points per il rilievo su Bologna del 07/03/2011*

Al febbraio del 2011, la situazione dei rilievi sulle 7 città

interessate dal progetto Energycity è quella di tab. 4.2

Il progetto Energycity è tuttora in corso, in quanto sono stati completati quasi tutti i rilievi sulle sette città interessate, e sono tuttora in esecuzione le differenti fasi di processing dei dati.

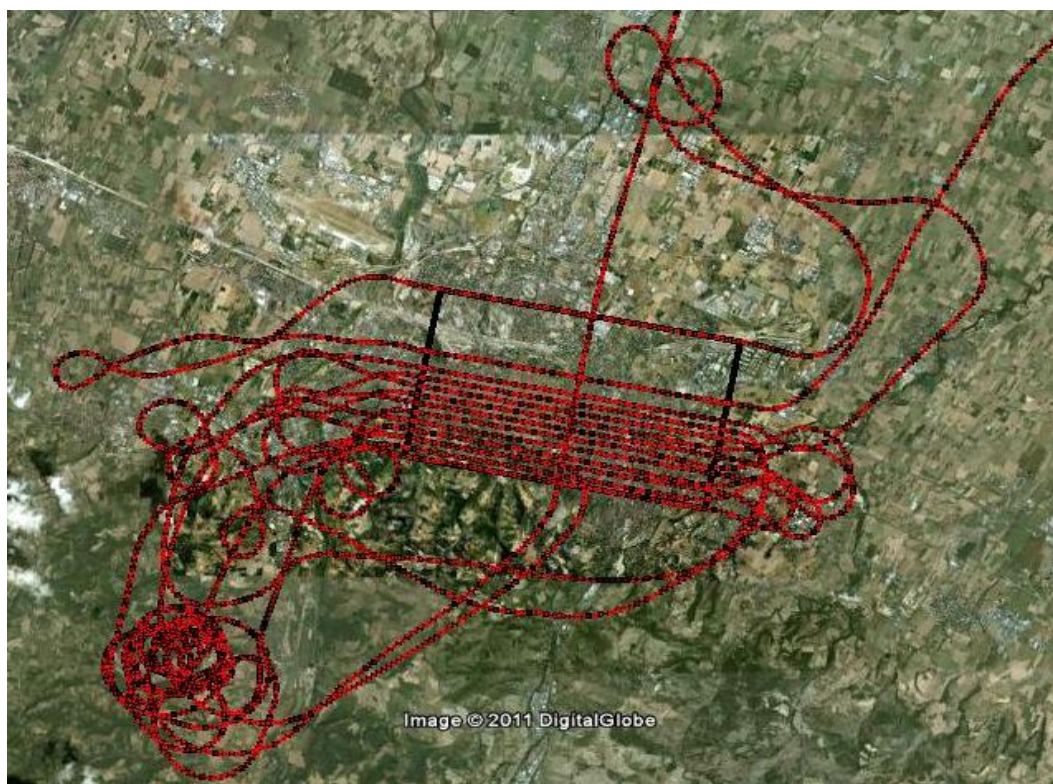


Fig. 4.16 - Traiettoria aerea per il rilievo su Bologna del 07/03/2011

Città	Rilievo infrarosso	Rilievo iperspettrale	Rilievo terrestre	Temper. contatto
Bologna	07/03/2011		SI	NO
Budapest	27/02/2012	22/03/2011	SI	SI
Ludwigsburg				
Praga				
Munich	15/03/2011	17/11/2011	SI	NO
Treviso	19/02/2011	13/09/2011	SI	NO
Velenje	25/02/2011	12/05/2011	SI	NO

Tab. 4.2 – Stato dei rilievi sulle diverse città al febbraio 2012

Il DICAM ha provveduto anche alla collezione dei datasets

esistenti messi a disposizione dai partners rappresentativi delle municipalità. Inizialmente è stato distribuito un questionario contenente una serie di quesiti su disponibilità e caratteristiche di diverse tipologie di dato, sia strettamente necessarie che ancillari, ovvero:

- cartografia numerica contenente un layer relativo agli edifici (con relativi attributi geometrici e strutturali), a grande scala (almeno 1:10000), da utilizzare come layer di riferimento per il sistema di supporto decisionale;
- Digital Elevation/Digital Terrain Model, in formato raster o vettoriale, necessario sia per le operazioni di ortorettifica delle immagini aeree che per l'applicazione del modello energetico sugli edifici;
- stazioni GNSS permanenti in prossimità dell'area di test con una frequenza di sampling sufficientemente elevata (1"), da utilizzare per l'orientamento esterno delle immagini aeree e per il calcolo delle coordinate dei Ground Targets misurati durante i rilievi terrestri;
- reti meteorologiche nell'area di test che misurino almeno con frequenza oraria le grandezze atmosferiche, necessarie sia come parametri di input per il codice di trasferimento radiativo che per definire le condizioni a contorno nell'applicazione del modello energetico sugli edifici;
- immagini aeree o satellitari sull'area di test, da implementare nel sistema WebGis per approcci multiscala.
- classificazioni recenti di land cover/land use.

A seguito delle risposte da parte dei partners, è cominciata la collezione dei dati in formato digitale: la tabella 4.3 offre un riepilogo dei dati effettivamente a disposizione per le finalità del progetto e delle relative caratteristiche al febbraio 2011, suddivise per città.

Città	Cartogr. numerica	DTM / DSM	Staz. GNSS permanente	Reti metereol .	Imm. aeree - satellitari
Bologna	UTM/ED50	5 m	SI	NO	SI
Budapest	Hungarian Datum 1972	5 m	SI	SI	SI
Ludwigsbu rg	Gauss Krueger/ DHDN	1 m	SI	NO	NO
Praga	UTM/ED50	NO	SI	SI	SI
Munich	Gauss Krueger/ DHDN	5 m	SI	NO	SI
Treviso	GB/ Fuso Ovest	1 m	SI	NO	SI
Velenje	Transverse Mercator - D48 Slovenia	25 m	SI	SI	SI

*Tab. 4.3 - Dati disponibili sulle diverse città del prog. Energycity*

Dall'analisi dei dati risulta evidente come i datasets raccolti nelle varie città abbiano delle specifiche molto diverse tra loro, sia in termini di caratteristiche principali (periodo di produzione, scala nominale, proiezione/datum, modalità di creazione del dato, risoluzione e formato dei files) che per i contenuti di dettaglio (ad esempio gli attributi dei layer relativi agli edifici, o le classi di land cover/land use). Per la successiva implementazione dei diversi datasets nella piattaforma WebGis e l'applicazione del modello energetico è stato necessario armonizzare i dati, ovvero renderli coerenti tra loro e in un sistema di riferimento comune.



Si è dunque provveduto alla conversione dei files in formati standard (shapefiles per le mappe vettoriali, files .xyz per i modelli di elevazione digitale, files Geotiff per tutte le immagini raster) e in proiezioni cartografiche comuni (UTM-WGS84, zona 33N); altro tema, di competenza di altri partner del progetto, è l'armonizzazione degli attributi degli edifici presenti sulla cartografia numerica (funzione e tipologia dell'edificio, tipologia strutturale, fonte d'energia utilizzata per il riscaldamento, etc.).

### **4.3 La sperimentazione sull'area urbana di Treviso**

L'area di test su cui la sperimentazione è in una fase più avanzata è la città di Treviso, dove:

- sono stati acquisite sia le immagini infrarosse che le immagini iperspettrali (rispettivamente in data 19/02/2011 e il 13/09/2011);
- sono già stati prodotti dall'OGS gli ortomosaici termici (di temperatura non corretta) ed iperspettrali di tutta l'area di test (circa 40 kmq);
- sono stati raccolti ed elaborati tutti i dati raccolti durante la campagna di rilievo terrestre, con la produzione delle monografie per tutte le ground truths rilevate (10 in questo caso), nonché i dati dalla stazione GNSS permanente e dalle stazioni metereologiche;
- gli ortomosaici termici ed iperspettrali di un'area relativamente più piccola (1,63 Km<sup>2</sup>) sono stati ulteriormente corretti geometricamente dal DICAM mediante l'utilizzo di cinquantacinque GCP individuati sulla cartografia digitale a disposizione (in scala nominale 1:10000) e coregistrati tra loro;
- è stata effettuata la correzione radiometrica delle immagini per gli effetti atmosferici, con l'applicazione del codice MODTRAN (utilizzando come dati di input sia le misure atmosferiche dei dataloggers che i dati da fonti alternative quali l'aeroporto o le stazioni metereologiche) e il calcolo dei valori di temperatura di corpo nero;
- sono stati calcolati i valori di temperatura corretta in corrispondenza dei ground points, utilizzando come valori di emissività quelli stimati durante i rilievi terrestri, in modo

da effettuare test statistici sulle differenze tra le due temperature misurate.

L'intero flusso di processing effettuato sulle immagini aeree al fine di calcolare il mosaico di temperature superficiale delle coperture da implementare nel sistema WebGis è schematizzato nella fig. 4.17.

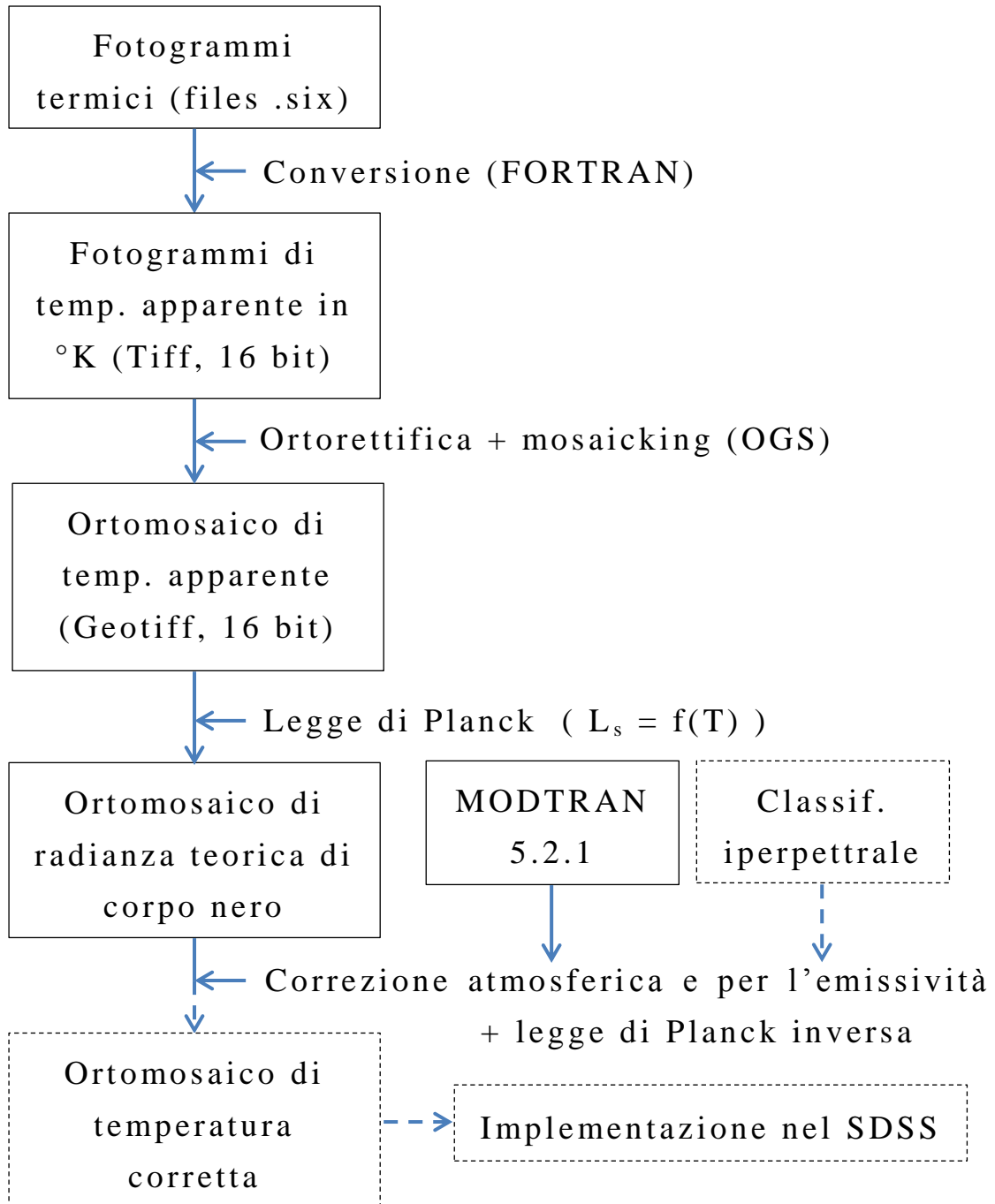


Fig. 4.17 –Workflow sulle immagini termiche aeree per la creazione del

### *mosaico di temperatura superficiale*

L'acquisizione termica sull'area di Treviso è stata effettuata il 19/02/2011, tra le 18.45 e le 21.05, con l'acquisizione di 2368 immagini termiche sull'area di test di fig. 4.18: la temperatura atmosferica al suolo è stata registrata tramite datalogger TH10 installato a 2m d'altezza in Via San Nicolò 60 (nel punto di coordinate geografiche 45°39'50"N, 12°14'22,5"E), con frequenza di sampling di 2". Durante il volo sono state rilevati 10 punti a terra tra le 19:10 e le 20:50, di cui sono state prodotte le relative monografie riportate nell'allegato 1.



*Fig. 4.18 – Area di test di Treviso*

#### **4.3.1 Operazioni preliminari**

I singoli fotogrammi sono stati inizialmente convertiti in formato

TIFF a 16 bit tramite un software in codice FORTRAN sviluppato dall'ing. Emanuele Mandanici, assegnista di ricerca presso il DICAM: il software originale fornito dal produttore con la camera termica (NEC TS9260) consente l'esportazione delle immagini solamente in formato JPEG, e solo dopo la selezione della palette da utilizzare, rendendo possibile la visualizzazione intuitiva delle immagini termiche ma precludendo ogni analisi quantitativa sui valori di Digital Number. L'unico modo previsto dal software per conservare tutte le informazioni acquisite dal sensore in termini di temperatura è l'esportazione di files di testo (o di tabelle Excel), che però devono poi essere riconvertiti in immagini digitali per poter essere utilizzati con i software di image processing.

Il software sviluppato invece consente invece l'esportazione in batch delle immagini memorizzate dalla termocamera in formato TIFF (senza applicare quindi alcuna compressione dell'immagine), nelle quali il DN del pixel è un numero intero che rappresenta la temperatura apparente dell'oggetto (in centesimi di °K) così come elaborata dal software interno della camera. E' da evidenziare come le immagini di output siano composte da una singola banda (che rappresenta la temperatura dei pixels), che può essere visualizzata in livelli di grigio: in realtà l'elevata risoluzione radiometrica delle immagini di output impedisce la fotointerpretazione delle immagini senza l'applicazione preliminare di algoritmi di contrast stretching.

I singoli fotogrammi in formato TIFF sono stati quindi affidati all'OGS per le operazioni di ortorettifica e mosaicking, effettuate sotto la supervisione del DICAM in quanto leader del WP4, al fine di creare un singolo mosaico georiferito di temperatura apparente sull'intera area di test.

### 4.3.2 Geocodifica e correzione geometrica

Per poter utilizzare immagini telerilevate in combinazione con altri dati georiferiti (siano essi in formato raster o vettoriale) all'interno di Sistemi di Informazione Geografica (GIS) è necessaria l'operazione di geocodifica, ovvero l'assegnazione di coordinate cartografiche al centro dei pixels che la compongono in un determinato sistema di riferimento (proiezione e datum).

Naturalmente l'accuratezza richiesta nell'assegnazione delle coordinate ai punti della scena è funzione della risoluzione a terra dell'immagine e degli scopi per cui essa verrà utilizzata; nel caso della termografia aerea per l'analisi degli edifici è indispensabile che ci sia una buona congruenza geometrica tra i contorni degli edifici derivati da cartografia numerica e la traccia delle loro coperture sulle immagini termiche.

Le deformazioni sulle immagini acquisite dal sensore sono dovute a diverse fonti d'errore, tra le quali (Brivio, 2006):

- il movimento relativo della terra e della piattaforma d'acquisizione;
- le caratteristiche di acquisizione del sensore, come l'ampiezza del Field of View e la ripresa non nadirale;
- la curvatura terrestre e le variazioni altimetriche della scena;
- la variazioni di posizione della piattaforma durante il rilievo in termini di assetto e velocità.

Esistono due tipi di approccio per la correzione delle deformazioni spaziali nelle immagini digitali:

- i metodi analitici, che prevedono la modellazione parametrica rigorosa dei processi fisico-geometrici di generazione delle immagini per la risoluzione degli errori sistematici dovuti al sistema di acquisizione, agli effetti di

rotazione della terra e a tutti quei fenomeni di deformazione con effetti prevedibili e costanti nel tempo. Essi richiedono una serie di informazioni legate all'assetto del mezzo, alla configurazione geometrica di acquisizione e alle caratteristiche del sensore;

- i metodi sintetici, che utilizzano una serie di punti d'appoggio a terra (Ground Control Points) di coordinate note per stabilire delle relazioni matematiche tra le coordinate immagine dei pixels e le corrispondenti coordinate degli oggetti sulla superficie terrestre. Essi non considerano il processo di generazione delle immagini o il tipo di deformazioni presenti, e perciò richiedono solamente la selezione e il riconoscimento dei punti d'appoggio sulle immagini senza alcuna informazione su sensore e caratteristiche geometriche d'acquisizione.

Solitamente per la correzione di immagini satellitari a bassa risoluzione si utilizzano tecniche analitiche rapide basate sui parametri orbitali della piattaforma, mentre per immagini a risoluzione più elevata da utilizzare per analisi a scala locale o regionale si preferisce utilizzare tecniche sintetiche, che generalmente permettono di ottenere deformazioni limitate e un migliore *fitting* tra immagini di output e cartografia di riferimento.

L'approccio sintetico per il raddrizzamento delle immagini prevede un'analisi statistica per la ricerca di funzioni di correzione delle coordinate: questo metodo si basa sull'ipotesi che le coordinate cartografiche dei GCP non siano affette da errore, a differenza delle corrispondenti coordinate immagine.

La procedura sintetica di rettifica si compone di tre fasi distinte (Brivio, 2006):

- l'identificazione dei GCP, che devono essere degli oggetti

con elevato contrasto facilmente identificabili sia sulle immagini termiche che sulla cartografia numerica. Ogni GCP sarà caratterizzato dalle coordinate immagine  $(r,c)$  e dalle corrispondenti coordinate cartografiche  $(x,y)$ .

- la definizione delle funzioni di mappatura, che viene effettuata tramite le coordinate immagine e cartografiche di ogni GCP. Le due funzioni di trasformazione generiche  $f,g$ , sono così definite:

$$\begin{aligned}x &= f(r,c) \\ y &= g(r,c)\end{aligned}$$

- l'immagine warping, ovvero la deformazione dell'intera immagine sulla base delle precedenti funzioni, in modo da costruire sulla cartografia una griglia regolare di celle i cui centri rappresentano i pixels dell'immagine corretta. Per ogni pixel i Digital Number vengono ricalcolati mediante algoritmi di ricampionamento radiometrico (*resampling*), in quanto i centri dei pixels dell'immagine corretta non corrispondono a quelli dell'immagine originale e si rende perciò necessario alterare i valori radiometrici mantenendo minima la perdita di informazione sull'immagine.

Le funzioni di mappatura più utilizzate sono le polinomiali e le razionali. Note le coordinate immagine  $(r,c)$  e le coordinate cartografiche  $(x,y)$  di un punto di appoggio, il modello generale della funzione di mappatura di tipo polinomiale è (Brivio, 2006):

$$\begin{aligned}x = f(r,c) &= \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^{m-j} a_{jk} * r^j * c^k \\ y = g(r,c) &= \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^{m-j} b_{jk} * r^j * c^k\end{aligned}$$

dove  $m$  è il grado del polinomio,  $x$  e  $y$  sono i valori stimati dalla trasformazione polinomiale delle coordinate immagine e  $a_{jk}$  e  $b_{jk}$



sono coefficienti che vengono stimati con il metodo dei minimi quadrati.

La trasformazione di grado 1 si dice affine, e consiste in una rototraslazione con variazione di scala; in questo caso le incognite sono sei, e le funzioni si riducono a

$$\begin{aligned}x &= a_{00} + a_{10} * r + a_{20} * c \\y &= b_{00} + b_{10} * r + b_{20} * c\end{aligned}$$

Le funzioni razionali polinomiali (RPF, Rational Polynomial Function), invece, determinano una relazione tra le coordinate immagine bidimensionali (r,c) e le corrispondenti coordinate tridimensionali (x,y,z) dei punti di appoggio mediante rapporti tra funzioni polinomiali del tipo

$$\begin{aligned}r &= \frac{P_1(x, y, z)}{P_2(x, y, z)} \\c &= \frac{P_3(x, y, z)}{P_4(x, y, z)} \\P_n &= \sum_{j=0}^{m_1} \sum_{k=0}^{m_2} \sum_{l=0}^{m_3} a_{ijk} * x^i * y^j * z^k\end{aligned}$$

dove i coefficienti  $a_{ijk}$ , chiamati RPC (Rational Polynomial Coefficients) vengono determinati col metodo dei minimi quadrati utilizzando un congruo numero di punti di coordinate note.

Si sottolinea come per ottenere dei buoni risultati sia necessario l'inserimento di numerosi punti d'appoggio sulla cartografia per la derivazione delle coordinate. Questa risulta un'operazione piuttosto delicata, in quanto il modello ipotizza che la posizione dei GCP sia affetta da errori solamente sulle immagini che si intendono raddrizzare e non sulla cartografia; inoltre, all'aumentare del grado del polinomio di trasformazione, possono verificarsi degli errori grossolani in zone lontane dai GCP, per cui risulta importante, anche, che la loro disposizione sia quanto più possibile omogenea sulla scena e che ce ne siano alcuni localizzati sulle zone di bordo in modo da evitare errori di

estrapolazione (Brivio, 2006).

Per valutare l'accuratezza della trasformazione vengono analizzati statisticamente i residui tra le posizioni reali  $(x_i, y_i)$  e quelle stimate dalla funzione di mapping  $(\hat{x}_i, \hat{y}_i)$  sui Checkpoints, un altro set di punti con coordinate cartografiche note. L'errore  $R_i$  associato al punto  $i$ -esimo è dato da

$$R_i = \sqrt{(R_{xi}^2 + R_{yi}^2)}$$

con

$$R_{xi} = x_i - \hat{x}_i \quad R_{yi} = y_i - \hat{y}_i$$

L'accuratezza globale viene espressa in termini di scarto quadratico medio, ovvero del valore di

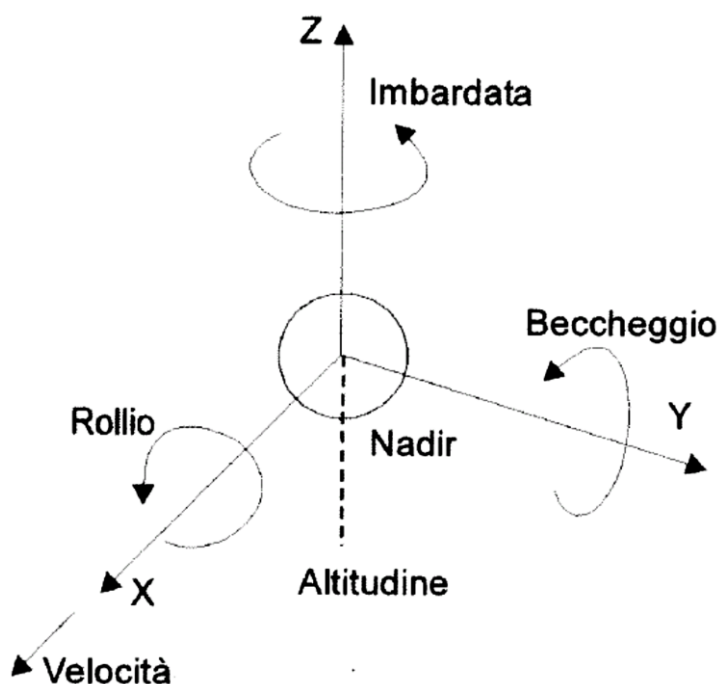
$$R_{tot} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n R_{xi}^2 + R_{yi}^2}{n - 1}}$$

L'operazione di rettifica dell'immagine può considerarsi completata con successo se l'RMSE (Root Mean Square Error) è dell'ordine di un pixel. Per incrementare l'accuratezza della trasformazione è possibile operare sulla selezione dei GCP (aggiungendone altri, o sostituendo quelli che presentano scarti maggiori) o sulla funzione di mapping da utilizzare (tipo, ordine della polinomiale).

Nel progetto Energycity è prevista l'implementazione delle immagini termiche acquisite durante i rilievi aerei nel sistema di supporto spaziale delle decisioni, che conterrà anche la cartografia vettoriale degli edifici di ogni area di test: il sistema prevede che la temperatura superficiale di riferimento da assegnare ad ogni edificio venga calcolata come la media spaziale dei pixels che compongono la copertura. Per evitare errori di sampling per pixel che non appartengono all'edificio viene applicato un buffer all'interno di ogni poligono, la cui ampiezza è decisa in base alla precisione raggiunta nelle operazioni di geocodifica. Per ottenere dei mosaici termici che abbiano una

buona corrispondenza sulle cartografie vettoriali l'operazione di georiferimento dei mosaici si realizza in due fasi successive. Nella prima, l'Istituto di Oceanografia e Geofisica Sperimentale di Trieste, responsabile anche dell'organizzazione dei voli termici ed iperspettrali e dell'acquisizione delle immagini, utilizza un approccio analitico per l'ortorettifica dei fotogrammi delle diverse strisciate, operazione per cui vengono utilizzati:

- la traiettoria ottenuta dall'elaborazione in post-processing dei dati acquisiti dal ricevitore GPS installato sull'aereo (e delle corrispondenti registrazioni della stazione GNSS permanente in prossimità dell'area di test);
- le misure degli angoli di beccheggio (pitch) imbardata (yaw) e rollio (roll) ottenute dalla piattaforma inerziale installata sull'aereo (*fig. 4.19*);
- la lista delle immagini e i relativi istanti di acquisizione;
- il modello di elevazione digitale del terreno per la correzione degli effetti topografici.



*Fig. 4.19 – Angoli di beccheggio, rollio e imbardata (da Brivio et al., 2006)*

Questa fase di pre-elaborazione delle immagini elimina le deformazioni indotte dal sistema di ripresa, dal moto della piattaforma aerea e alle variazioni altimetriche nelle scene.

Il software utilizzato dall'OGS per l'ortorettifica è il TerraPhoto della Terrasolid Ltd.: per l'orientamento dei fotogrammi vengono utilizzati i dati appena citati ed una serie di punti omologhi che, per immagini ottiche, vengono identificati automaticamente dal software sui fotogrammi e controllati visivamente dall'utente: a causa della presenza di una singola banda spettrale sui fotogrammi questa fase è risultata particolarmente complessa sulle immagini termiche, in quanto in molti casi i punti omologhi identificati dal software non corrispondevano agli stessi oggetto al suolo.

Si ricorda che durante l'operazione di mosaicking non è stato applicato nessun algoritmo di normalizzazione radiometrica tra i fotogrammi: in questo modo, anche se nel mosaico risultano maggiormente visibili gli effetti delle sovrapposizioni longitudinali e trasversali, i valori digitali delle immagini digitali vengono conservati (a meno degli effetti di resampling, eseguito secondo il criterio Nearest Neighbour).

Successivamente all'ortorettifica delle immagini e alla creazione del mosaico termico di tutta l'area di Treviso da parte di OGS, si è effettuata un'analisi visiva sulla congruenza tra le immagini e la cartografia numerica. E' risultata necessaria un'ulteriore operazione di correzione geometrica in quanto i residui calcolati su alcuni punti della cartografia numerica facilmente individuabili sulle immagini termiche (spigoli degli edifici, camini caldi) risultavano eccessivi.

Gli ortomosaici mostravano inoltre errori grossolani distribuiti in modo apparentemente casuale, con diverse incongruenze tra i diversi fotogrammi (*figg. 4.20 e 4.21*) in particolare nelle aree di

sovrapposizione trasversale tra le strisciate. Per rendere congruenti le immagini con i dati cartografici forniti dalle municipalità è stata applicata quindi un'operazione di raddrizzamento mediante approccio sintetico su un'area ristretta (di circa 1,63 Km<sup>2</sup>) rappresentata in fig. 4.22 con le posizioni dei target su cui sono stati effettuati i rilievi terrestri.

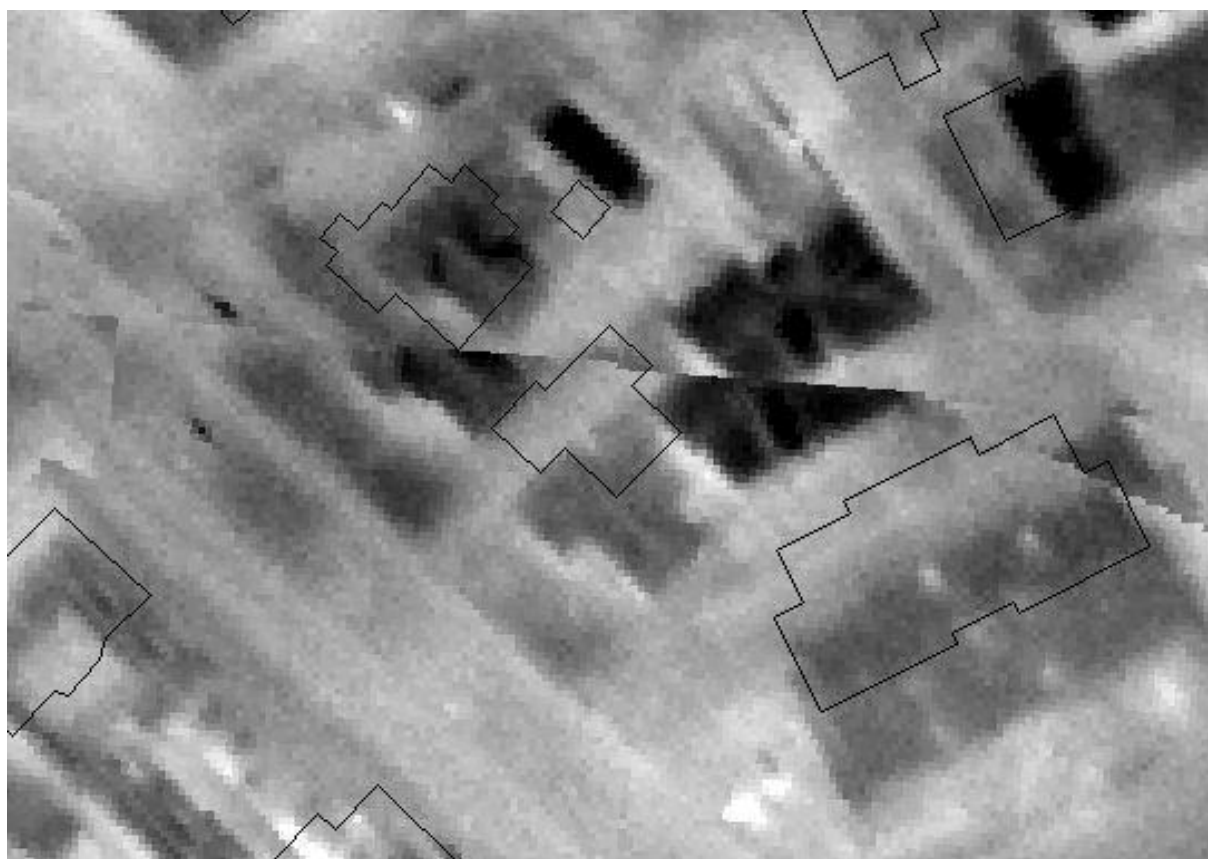


*Fig. 4.20 – Errori evidenti negli ortomosaici termici*

Per facilitare la selezione dei GCP sul mosaico termico è stato preventivamente applicata un'enfatizzazione lineare del contrasto, in modo da rendere maggiormente visibili i dettagli sulle immagini.

Per la selezione dei Ground Control Points sono stati selezionati alcuni spigoli di edificio che mostrassero un elevato contrasto sull'immagine termica e che fossero contemporaneamente presenti

sulla cartografia vettoriale; per l'immagine termica di Treviso sono stati utilizzati 55 GCP distribuiti uniformemente sull'area di test (*fig. 4.23*). L'immagine termica è stata quindi rettificata mediante tre differenti funzioni di mapping (trasformazione affine, polinomiale di 3° grado e triangolazione di Delauney) ed è stata valutata l'accuratezza dei metodi dall'analisi dei residui su un set di altri 25 Checkpoints (*fig. 4.23*). I checkpoints per la verifica dell'accuratezza sono stati selezionati in maniera totalmente indipendente dal set dei GCP utilizzati per definire la trasformazione.



*Fig. 4.21 - Errori nelle aree di sovrapposizione tra le strisciate*

La correzione geometrica con metodo sintetico degli ortomosaici termici è stata effettuata tramite il software ENVI 4.8 con l'operazione "Image to Map registration", utilizzando le coordinate derivate dalla trasformazione; anche il calcolo dell'errore RMS sui checkpoints per le diverse trasformazioni è



stato effettuato con il medesimo software.

Sono state esportate come file di testo le coordinate dei punti (siano essi GCP o CHK) derivati dalla cartografia digitale; esse sono poi state convertite in coordinate UTM-WGS84, zona 32 Nord per renderle coerenti con il sistema di coordinate del mosaico termico.



*Fig. 4.22 – Area di raffinamento della correzione geometrica e posizione delle ground truths*

I risultati della tabella 4.4 mostrano come con tutte le trasformazioni sperimentate l'errore quadratico medio risulti comunque eccessivo (mai inferiore ai 6 m), e come tra le differenti funzioni di raddrizzamento utilizzate quella che mostra un'accuratezza migliore è la Triangolazione di Delauney: i risultati sono confermati dall'analisi visiva dei diversi mosaici (figg. 4.24 e 4.25).

Metodo	RMS (pixels)		Errore max	
	pixels	m	pixels	m
Imm. originale	7,3368	3,67	12,8861	6,44
RST	6,8657	3,43	11,7836	5,89



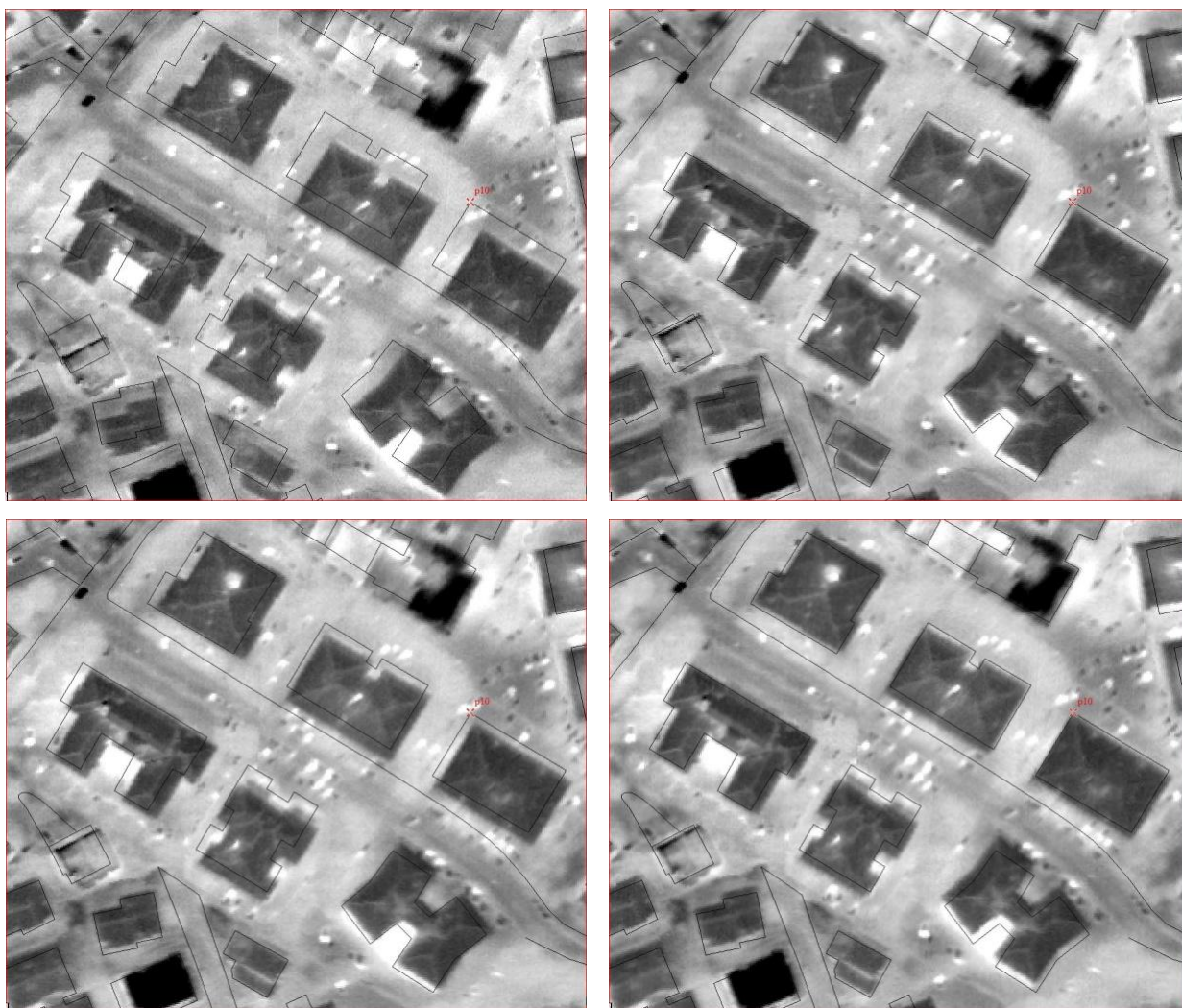
Polin. 3° grado	6,8504	3,43	10,0145	5,00
Triang. Delauney	6,5453	3,27	9,9349	4,97

*Tab. 4.4 – Errore quadratico medio e scarto massimo per i diversi metodi di raddrizzamento sperimentati*

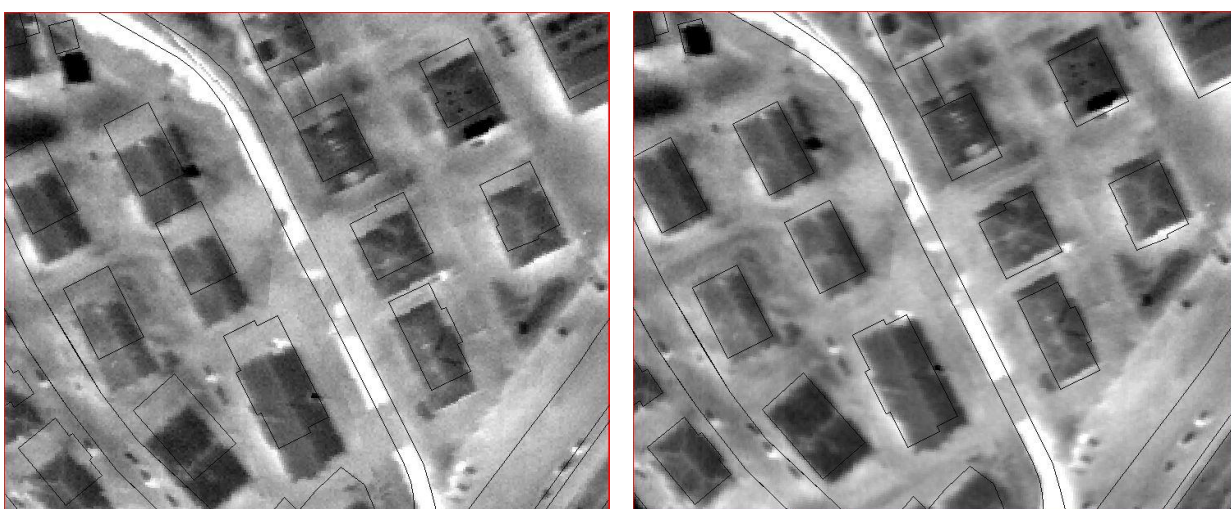


*Fig. 4.23 – Ground Control Points (in rosso) e Checkpoints (In giallo) sull'area di test di Treviso*





*Fig. 4.24 – Errori geometrici: (a)Mosaico originale (b)Polin.3°grado  
(c)RST (d) Triang. Delauney*



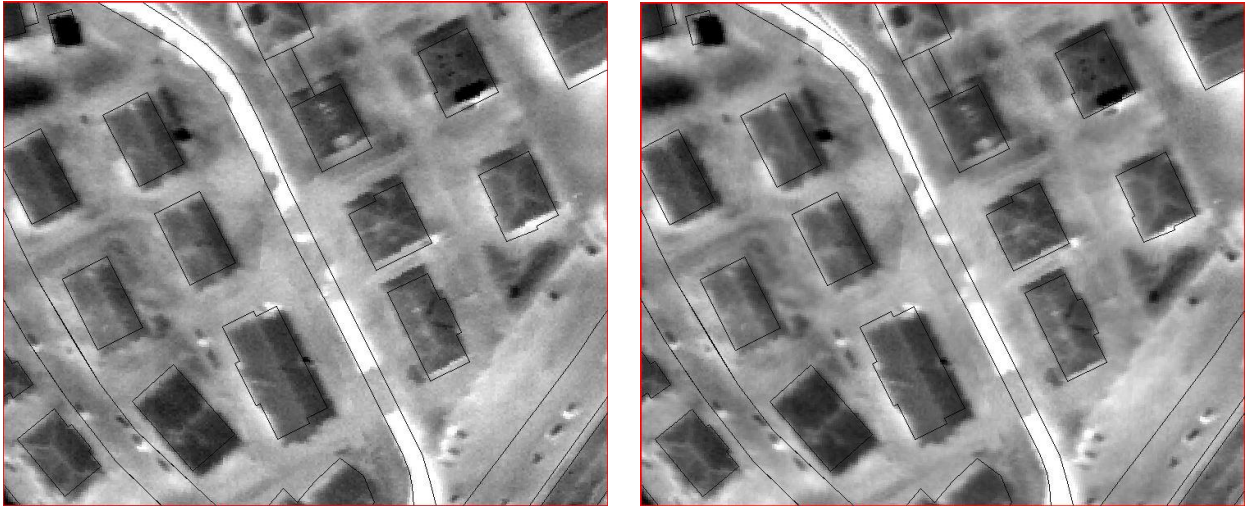


Fig. 4.25 – Errori geometrici: (a) Mosaico originale (b) Polin. 3° grado (c) RST (d) Triang. Delauney

### 4.3.3 Calcolo della radianza teorica al sensore

La fase successiva del processing è stata la correzione radiometrica del mosaico termico col calcolo della ground radiance effettivamente emessa dagli oggetti al suolo, il che consente successivamente di calcolare la temperatura superficiale corretta delle coperture una volta noto il valore di emissività. Il modello su cui si basa la correzione è analogo a quello utilizzato da Allison, descritto al capitolo 3, nel quale la radianza al sensore è descritta da

$$L_S = \varepsilon * L_T + 1 - \varepsilon * F * L_d + 1 - F * L_b * \tau + L_u$$

considerando uno SVF unitario l'equazione si semplifica in:

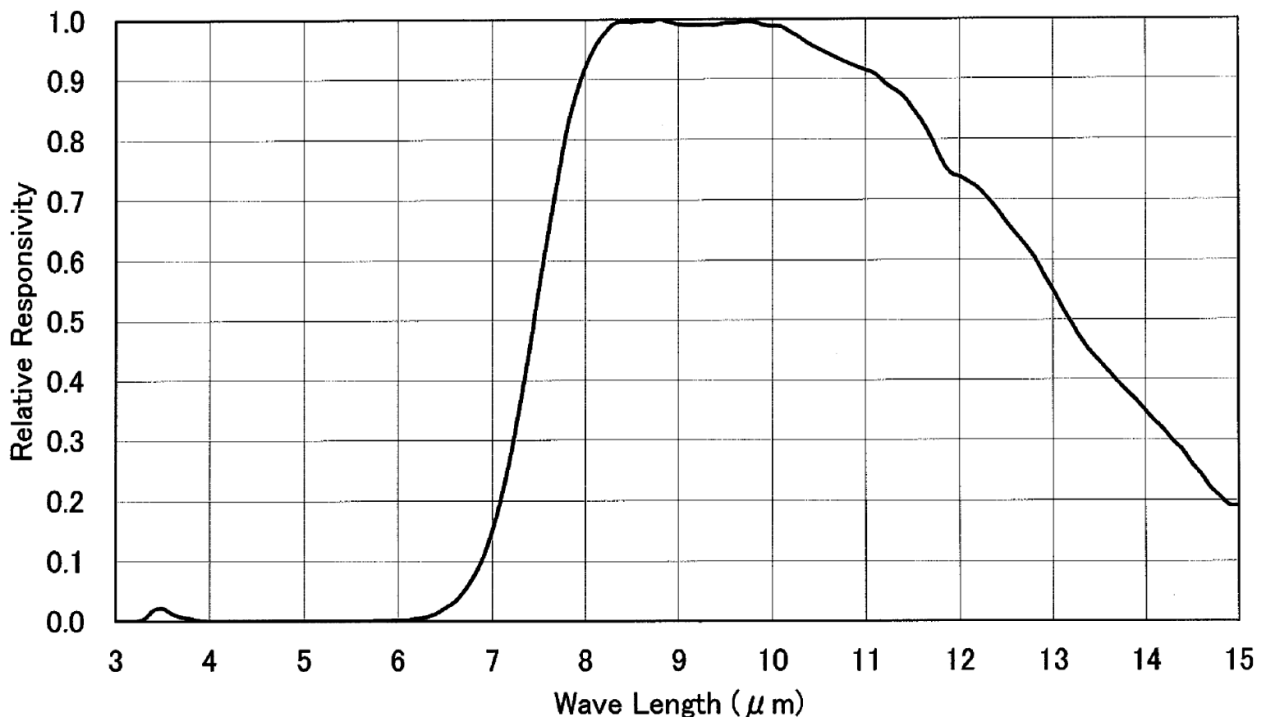
$$L_S = \varepsilon * L_T + 1 - \varepsilon * L_d * \tau + L_u$$

per cui è possibile derivare la radianza di corpo grigio dei pixel tramite la relazione

$$L_T = \frac{L_S - 1 - \varepsilon * L_d - L_u}{\varepsilon * \tau}$$

La risposta spettrale del sensore termico non viene implementata nel calcolo degli integrali previsto da questa fase di processing,

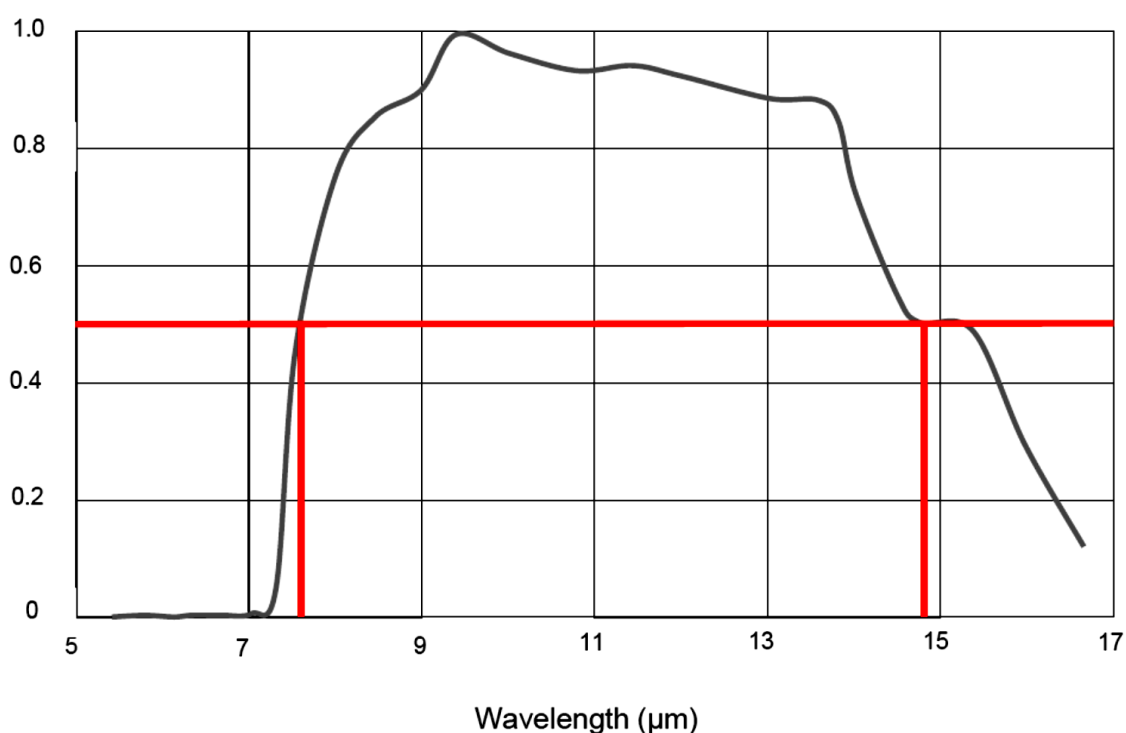
anche perchè il software di esportazione della termocamera NEC non consente di esportare le immagini in formato RAW (ovvero con i valori di radianza al sensore) e quindi essa risulterebbe comunque inutile per derivare i valori effettivi di radianza al sensore.



*Fig. 4.26 - Risposta spettrale normalizzata tipo della termocamera NEC*

Da sottolineare come le specifiche tecniche dichiarate dalle casa costruttrici delle due camere termiche rimangono teoriche, considerato che senza la disponibilità di dati sulla risposta spettrale e sull'effettiva banda d'acquisizione è impossibile effettuare delle analisi sull'attendibilità dei dati forniti. Purtroppo sia la società NEC che la FLIR si sono rifiutate di fornire la risposta spettrale normalizzata del sensore o altre informazioni equivalenti, e dopo ripetuti tentativi hanno trasmesso solamente dei grafici tipo di risposta spettrale normalizzata (*figg. 4.26 e 4.27*), senza alcun valore numerico e senza specificare se fosse riferita solamente al sensore infrarosso o a tutto il sistema d'acquisizione.

Seppur carenti, i dati ottenuti mostrano come effettivamente la banda d'acquisizione di entrambi i sensori utilizzati per i rilievi sia diversa da quella dichiarata (8-14  $\mu\text{m}$ ), e sarebbe perciò necessario nell'utilizzo combinato delle immagini termiche aeree e terrestri tenere conto anche di queste differenze. Uno degli effetti principali consiste nella variabilità spettrale dell'emissività dei diversi materiali: seppure sotto l'ipotesi di corpo grigio l'emissività sia considerata costante in tutta la regione d'acquisizione, questa approssimazione nella realtà non è valida, e l'emissività effettiva per i due sensori potrebbe risultare diversa (nonostante, in teoria, con una corretta modellazione dei parametri atmosferici i sensori debbano fornire valori di temperatura uguali per la stessa superficie).



*Fig. 4.27 - Risposta spettrale normalizzata tipo della termocamera FLIR*

La prima fase del processing, ovvero il calcolo della radianza al sensore dalle immagini aeree (memorizzate in scala di temperatura), consiste infatti nel calcolo della radianza teorica al sensore che deriverebbe dall'inversione della legge di Planck

sull'intera banda d'acquisizione del sensore infrarosso aereo (che dal grafico che è stato fornito risulta tra i 7 e i 16  $\mu\text{m}$ ) considerando una risposta spettrale normalizzata ideale, ovvero pari a 1 per qualsiasi lunghezza d'onda. Il procedimento è valido se si suppone che nel calcolo della temperatura la termocamera implementi la risposta spettrale effettiva del sensore e che, quindi, con la correzione atmosferica interna disattivata e l'emissività unitaria della superficie il sensor model diventi

$$W_{tot} = \varepsilon * \tau * W_{obj} + 1 - \varepsilon * \tau * W_{refl} + 1 - \tau * W_{atm} = W_{obj}$$

e la temperatura derivata dal modello sia teoricamente data dalla semplice inversione della legge di Planck.

Anche nella correzione atmosferica per il calcolo della ground radiance si tiene conto della banda d'acquisizione effettiva del sensore, integrando i termini radiometrici derivati dal modello fisico radiativo appunto tra le lunghezze d'onda che lo delimitano. Questa considerazione è confermata dal confronto, per il caso di Treviso, tra le temperature dei dieci targets rilevati durante le campagne di rilievo a terra e le temperature derivate sugli stessi punti a termine della correzione radiometrica delle immagini aeree: l'ordine di grandezza della differenza media tra i valori passa da alcuni  $^{\circ}\text{C}$  (ottenuti integrando tra 8-14  $\mu\text{m}$ , ovvero nella regione infrarossa dichiarata) ad alcuni decimi di grado (considerando come estremi le code del grafico in fig. 4.26). Ovviamente il campione non è sufficiente per stabilire quanto questo possa incidere sulla differenza tra le temperature e si attendono i mosaici termici relativi alle altre città per effettuare ulteriori analisi statistiche.

In assenza delle immagini RAW acquisite dalla termocamera aerea, il primo passo necessario per il calcolo della ground radiance consiste nell'applicare la legge di Planck per ottenere la radianza spettrale teorica di ogni pixel dalla temperatura



apparente del mosaico termico (che, si ricorda, è stato acquisito con correzione atmosferica disattivata ed emissività unitaria e non ha subito alterazioni ai DN durante la sua creazione). E' stata definita una Look Up Table (all. 2) calcolando n valori di radianza spettrale direzionale di corpo nero  $L_\lambda$  tra gli 8 e i 16  $\mu\text{m}$  (il range spettrale effettivo di acquisizione della termocamera aerea secondo il grafico 4.26) ad intervalli regolari di 0,1  $\mu\text{m}$ , ed al variare della temperatura superficiale del corpo tra i -10 e i +20°C per incrementi di 1°C (ovvero il range di temperatura all'interno del quale si trovano la gran parte dei pixels del mosaico originale). La formula utilizzata per il calcolo è quella descritta nel cap.1, con l'introduzione al denominatore del  $\pi$  per derivare la radianza spettrale direzionale ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}$ ) dall'emittanza spettrale emisferica:

$$L_\lambda = \frac{c_1}{\pi * \lambda^5} * \frac{1}{\exp \frac{c_2}{\lambda * T} - 1}$$

con  $c_1=3,7413*10^8$  [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-4}$ ] e  $c_2= 1,43878*10^4$  [ $\mu\text{m}\cdot\text{k}$ ].

Il grafico di fig. 4.28 mostra la radianza spettrale di corpo nero calcolata tra gli 8 e i 16  $\mu\text{m}$  per tre corpi rispettivamente a -10°C, 0° C e +20°C).

Il valore di radianza di corpo nero riferito all'intero intervallo spettrale considerato viene calcolato mediante integrazione numerica dei valori con la formula di Simpson tra gli 8 e i 16  $\mu\text{m}$ . Se si indicano con  $\lambda_i$  i valori di lunghezza d'onda per cui sono stati calcolati i rispettivi valori di radianza spettrale  $L_{\lambda_i}$ , con  $i=0,1,\dots,n$ , si può scrivere

$$L = \int_{8\mu\text{m}}^{16\mu\text{m}} L_\lambda d\lambda \cong \frac{h}{3} * (L_{\lambda_0} + 4 * L_{\lambda_1} + 2 * L_{\lambda_2} + 4 * L_{\lambda_3} + \dots + 2 * L_{\lambda_{n-2}} + 4 * L_{\lambda_{n-1}} + L_{\lambda_n})$$

dove  $n = 80$  e  $h = (b-a)/n = (16\mu\text{m} - 8\mu\text{m})/80$ .

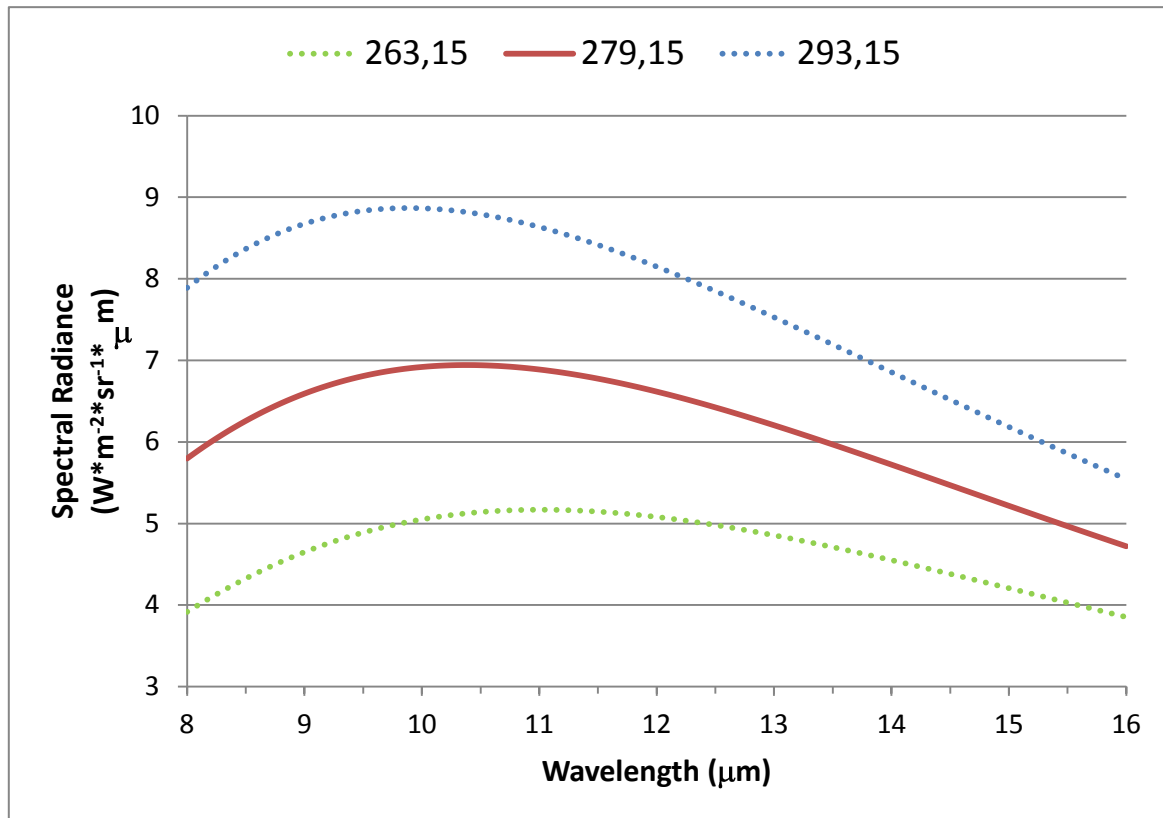


Fig. 4.28 – Radianza spettrale per corpi neri a diversa temperatura

Il grafico 4.29 mostra invece i valori integrali di radianza direzionale nella banda d'acquisizione del sensore per i diversi valori di temperatura considerati.

E' stata stabilita la relazione polinomiale di 2° grado che meglio interpolasse i valori di radianza calcolati al variare della temperatura, al fine di trasformare il mosaico termico dalla scala di temperatura a quella di radianza teorica al sensore. L'equazione per il calcolo di  $L_S$  ( $W*m^{-2}*sr^{-1}$ ) ottenuta è

$$L_S = 0,0040708 * T^2 - 1,458 * T + 139,32$$

che mostra un valore molto alto di  $R^2$ , pari a 0,99999996.

E' stata quindi definita l'espressione da implementare nella funzione *band math* di ENVI 4.8, al fine di convertire il mosaico termico dai valori di temperatura non corretta ai valori di radianza ipotetica al sensore. L'equazione utilizzata è

$$0.0040708D * b1^2 - 1.4580D * b1 + 139.32D$$

dove la D serve a trasformare i valori interi in valori double precision floating point (a 64 bit).

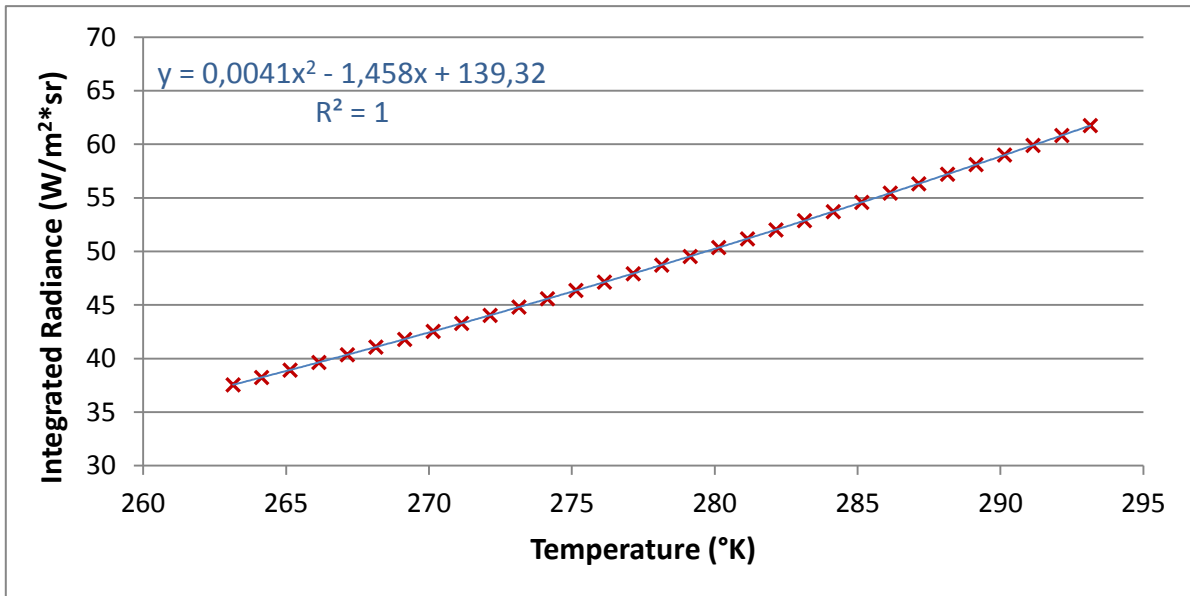


Fig. 4.29 – Radianza emessa tra gli 8 e i 16  $\mu\text{m}$  al variare temperatura

E' stata quindi definita l'espressione da implementare nella funzione *band math* di ENVI 4.8, al fine di convertire il mosaico termico dai valori di temperatura non corretta ai valori di radianza ipotetica al sensore. L'equazione utilizzata è

$$0.0040708D * b1^2 - 1.4580D * b1 + 139.32D$$

dove la D serve a trasformare i valori interi in valori double precision floating point (a 64 bit).

#### 4.3.4 Correzione radiometrica del mosaico e calcolo della temperatura superficiale

La fase successiva consiste nella correzione atmosferica delle immagini: tramite il codice di trasferimento radiativo MODTRAN (MODerate resolution atmospheric TRANsmission) 5.2.1 vengono modellizzati tutti i flussi radiativi e i processi che li coinvolgono. Si è deciso di utilizzare il MODTRAN perché, oltre a essere utilizzato e riconosciuto valido a livello mondiale, esso



copre il range spettrale dell'Infrarosso Termico e fornisce un'elevata risoluzione spettrale (fino a  $0,1 \text{ cm}^{-1}$ , corrispondenti a  $10 \cdot 10^{-4} \text{ }\mu\text{m}$ ).

Per la completa parametrizzazione del modello sono necessari i una serie di dati di input (memorizzati in un file di testo con estensione .tp5, sigla di "tape5") per la definizione:

- della geometria di acquisizione;
- delle caratteristiche del sensore;
- delle proprietà delle superfici al suolo;
- dei profili atmosferici di temperatura, pressione e concentrazione di gas al variare della quota;
- del modello di aerosol in termini di composizione e concentrazione.

Ovviamente nel caso non si disponga di tutti i dati necessari è possibile considerare valide alcune ipotesi (come il comportamento lambertiano delle superfici) o usare dei valori approssimati (valori integrali per l'adattamento dei profili atmosferici standard forniti dal modello), utilizzando quindi un modello semplificato.

Per l'applicazione del sensor model i parametri atmosferici necessari sono i valori di trasmittanza atmosferica e di radianza ascendente e discendente integrati nella banda d'acquisizione del sensore: per il calcolo vengono definite due differenti configurazioni del modello.

La prima, con la quale si derivano i valori spettrali di upwelling radianze e il valore di trasmittanza atmosferica integrale tra il suolo e il sensore termico, prevede che il sensore sia modellato ad una quota pari all'altezza di volo e rivolto verso il suolo. Il file .tp5 con i parametri di input (all. 3) è stato compilato considerando:

- quota del sensore di 0,85 Km;

- elevazione media del terreno di 15 m (derivata dai valori di elevazione del DEM sull'area di Treviso);
- visibilità di 10 Km (dalla stazione meteorologica dell'aeroporto militare di Treviso Istrana, con coordinate geografiche 45°41'N, 12°06'E);
- temperatura superficiale di 283°K (dalle temperature misurate durante i rilievi terrestri) con albedo nulla;
- concentrazione di CO<sub>2</sub> dai dati forniti dalla Divisione Monitoraggio Globale dell'Earth System Research Laboratory del NOAA (*fig. 4.30*), relativi alla concentrazione media mensile di CO<sub>2</sub> su scala globale, calcolata dalle osservazioni di diversi siti sulla superficie marina (disponibili al sito <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html>);
- profili atmosferici in quota di pressione, temperatura dell'aria e temperatura di rugiada derivati dal prodotto giornaliero MOD07\_L2 del sensore MODIS, operante sulla piattaforma Terra (<http://modis.gsfc.nasa.gov/>) con pixel di 5Km; i valori sono stati ottenuti come media all'interno di una finestra 3x3 centrata sulla città di Treviso;
- temperatura dell'aria e temperatura di rugiada del boundary layer (primo strato superficiale dell'atmosfera) dalla media temporale delle misure del datalogger fisso utilizzato nel rilievo terrestre, e pressione atmosferica dalla stazione meteorologica di Treviso S. Angelo (con coordinate geografiche 45°39'N, 12°11'E);
- angolo zenitale di 5° (corrispondente ad ¼ del FOV della camera termica aerea in direzione along track, pari a 21, 7°);
- un modello climatico "Mid-Latitude Winter" per tutti i valori che non sono stati definiti.

L'output del modello è memorizzato nel file chiamato tape 6 (con

estensione.tp6) e riporta, oltre ad un riepilogo dei parametri di input definiti, i valori di path radiance  $L_{U\lambda}$  e trasmittanza atmosferica  $\tau_\lambda$  al variare del numero d'onda ad intervalli di  $0,1 \text{ cm}^{-1}$ .

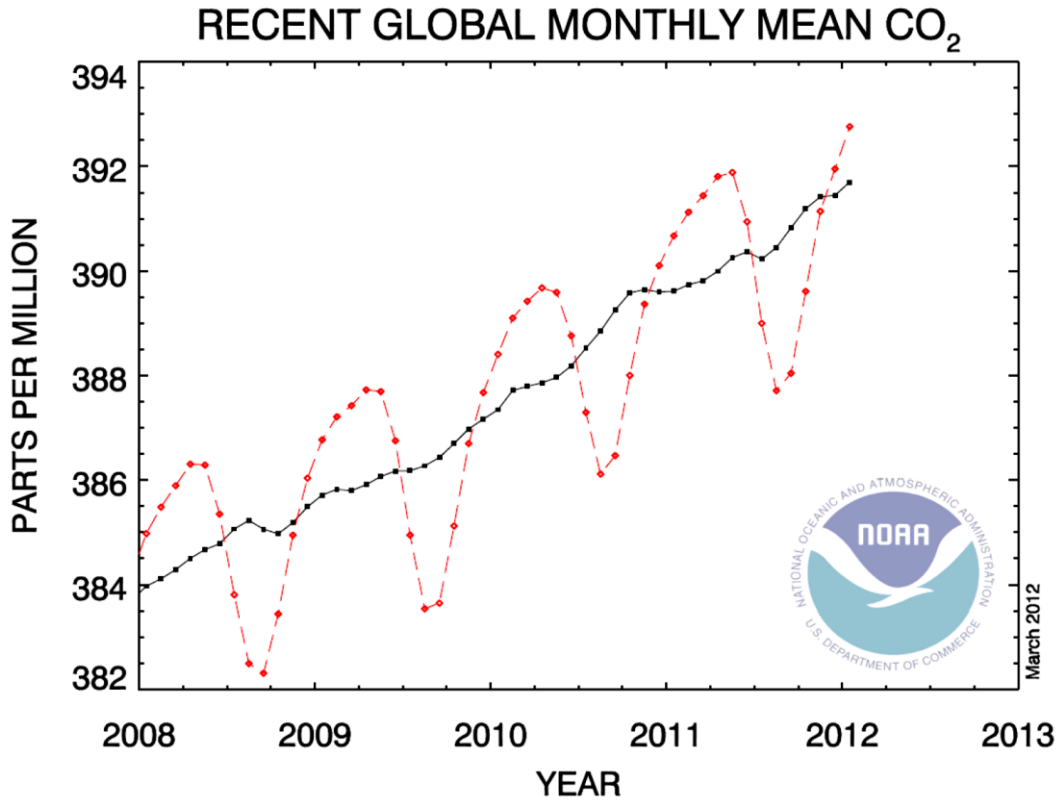


Fig. 4.30 – Dati mensili del NOAA sulla concentrazione globale di  $CO_2$

I valori spettrali invece sono riportati nel file con estensione .7sc (all. 4), ottenuto dal ricampionamento dei valori precedenti sui valori di lunghezza d'onda desiderati (tra gli 8 e i 16  $\mu\text{m}$  ad intervalli di  $0,1 \mu\text{m}$ ). Il valore di radianza upwelling  $L_U$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ ) da inserire nel calcolo della ground radiance è ottenuto per integrazione numerica di questi valori con la formula di Simpson, con una relazione analoga a quella utilizzata per la radianza di corpo nero:

$$L_U = \int_{8\mu\text{m}}^{16\mu\text{m}} L_{U\lambda} d\lambda \cong \frac{h}{3} * (L_{U\lambda_0} + 4 * L_{U\lambda_1} + 2 * L_{U\lambda_2} + 4 * L_{U\lambda_3} + \dots + 2 * L_{U\lambda_{n-2}} + 4 * L_{U\lambda_{n-1}} + L_{U\lambda_n})$$

dove  $n=80$  e  $h=(b-a)/n=(16\mu\text{m} - 8\mu\text{m})/80$ .

L'integrazione fornisce un valore di radianza ascendente di 13,6708 W\*m<sup>-2</sup>\*sr<sup>-1</sup>; il valore di trasmittanza media è invece riportato direttamente nel file tape 6, e risulta pari a 0,7402.

Per il calcolo della radianza downwelling vengono utilizzati nella definizione del file .tp5 (all. 5), oltre che una configurazione geometrica differente, anche dei diversi parametri atmosferici. In questo caso la parametrizzazione del modello prevede:

- sensore al suolo (con un'elevazione media di 15 m) rivolto verso l'alto;
- uno spessore d'atmosfera di 100 Km;
- temperatura Top Of Atmosphere pari a 0°K;
- valori integrali del contenuto di vapore acqueo e ozono derivati anch'essi dal prodotto MOD07\_L2 (in quanto i profili disponibili non coprono tutto lo spessore d'atmosfera, e si fermano a circa 35 Km);
- modello climatico "Mid-Latitude Winter" per tutti i valori che non sono stati definiti;
- l'iterazione del calcolo con angolo zenitale  $\theta$  variabile tra 0 e 90° per step di 5°.

Anche in questo caso il file .tp6 contiene tutti i fattori radiativi al variare del numero d'onda, mentre il file .7sc contiene i valori spettrali ricampionati al variare della lunghezza d'onda.

Anche qui viene calcolato tramite integrazione numerica con la formula di Simpson il valore di radianza integrale per ogni angolo zenitale considerato tramite la relazione seguente

$$L_d(\theta) = \frac{16\mu\text{m}}{8\mu\text{m}} L_{d\lambda} d\lambda \cong \frac{h}{3} * (L_{d\lambda_0} + 4 * L_{d\lambda_1} + 2 * L_{d\lambda_2} + 4 * L_{d\lambda_3} + \dots + 2 * L_{d\lambda_{n-2}} + 4 * L_{d\lambda_{n-1}} + L_{d\lambda_n})$$

Il grafico di fig. 4.31 mostra i valori di radianza discendente integrale al variare dell'angolo zenitale: come si può vedere i valori aumentano avvicinandosi all'orizzonte, a causa dello spessore maggiore d'atmosfera che contribuisce alla sua

formazione.

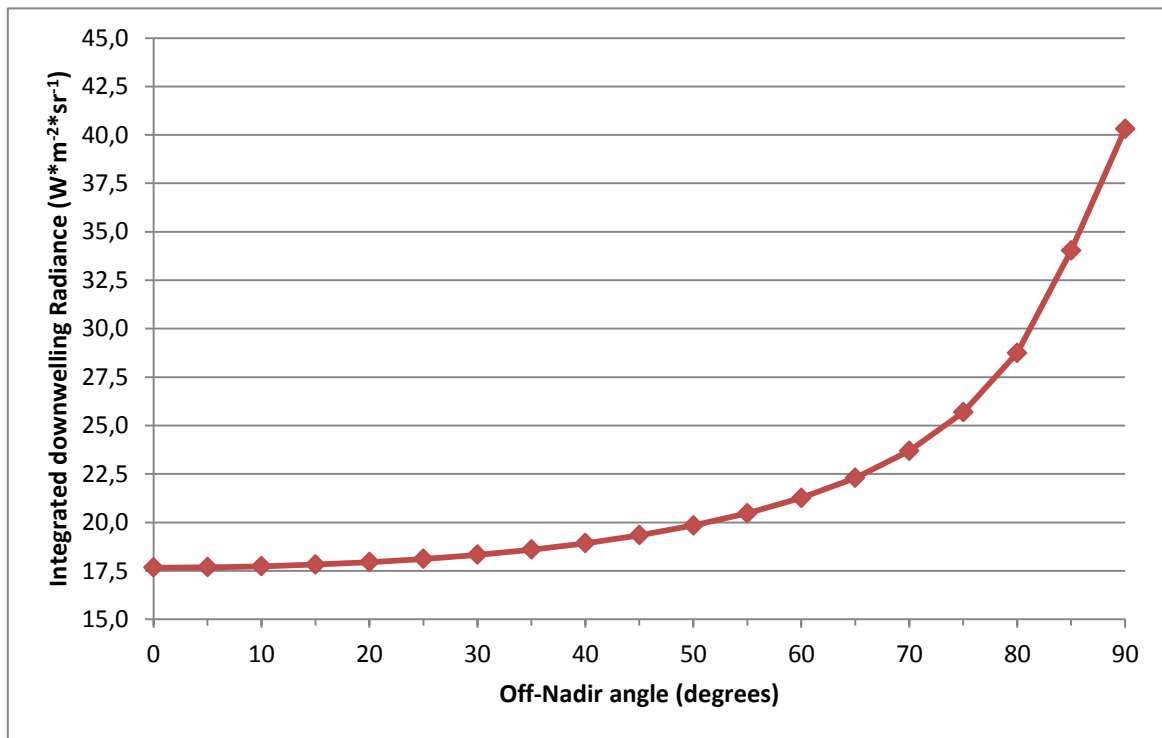


Fig. 4.31 – Radianza downwelling al variare dell'angolo off-nadir

Mentre per il calcolo della radianza ascendente è sufficiente una singola configurazione geometrica, la radianza discendente emisferica che viene riflessa in modo lambertiano dalla superficie è data dall'integrazione della radianza proveniente da tutte le direzioni all'interno dell'emisfera stessa. Se si indica con  $\theta$  l'angolo zenitale e con  $\varphi$  l'angolo azimutale, il valore di irradianza emisferica spettrale downwelling è data

$$M_d = \int_{\varphi=0}^{\varphi=2\pi} \int_{\theta=0}^{\theta=\frac{\pi}{2}} L_d(\varphi, \theta) * \sin\theta * \cos\theta \, d\theta \, d\varphi$$

che, trascurando la variazioni azimutali nello spazio, si può scrivere come

$$M_d = 2 * \pi * \int_{\theta=0}^{\theta=\frac{\pi}{2}} L_d(\theta) * \sin\theta * \cos\theta \, d\theta$$

Avendo già calcolato i valori di  $L_d(\theta)$ , si è quindi proceduto al calcolo dell'irradianza emisferica tramite integrazione numerica

della relazione precedente. Sotto l'ipotesi di superfici lambertiana è stato quindi possibile calcolare il valore di  $L_d$  come

$$L_d = \frac{M_d}{\pi}$$

Il valore di  $L_d$  è risultato di  $20,3973 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ .

Noti i valori di  $\tau$ ,  $L_d$  e  $L_u$ , è stato quindi possibile applicare il sensor model per calcolare la radianza al suolo in base ai valori di radianza al sensore del mosaico; non essendo ancora disponibili i valori di emissività derivati dalla classificazione delle immagini iperspettrali, in questa fase è stato considerato un valore di emissività costante pari a 0,95.

L'equazione di riferimento è

$$L_T = \frac{L_S - 1 - \varepsilon * L_d - L_u}{\varepsilon * \tau}$$

che viene definita tramite la funzione band-math di ENVI 4.8 utilizzando la sintassi seguente:

$$b1 - 0.7403D * (1D - \varepsilon) * 20.3973D - 13.6708D) / (0.7403D * \varepsilon).$$

Per valutare l'accuratezza delle correzioni atmosferiche è stata calcolata  $L_T$  tramite l'equazione precedente in corrispondenza dei ground points rilevati, utilizzando come  $\varepsilon$  i valori di emissività stimati durante i rilievi terrestri e reperibili dalle monografie.

Negli stessi punti è stato calcolato il valore di temperatura corretto (in °K) come soluzione positiva dell'equazione di 2° grado del tipo

$$L_S = a * T^2 + b * T + c$$

che correla la radianza di corpo nero alla temperatura superficiale, utilizzata per calcolare la radianza teorica al sensore.

La soluzione positiva dell'equazione risulta

$$T = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4 * a * c}}{2 * a} = \frac{1,458 + \sqrt{1,458^2 - 4 * 0,0040708 * (139,32 - L_S)}}{2 * 0,0040708}$$

ed è stata implementata in band math con la seguente sintassi  

$$(1.4580D + \text{sqrt}(1.4580D^2 - 4D * 0.0040708D * (139.32D - b1))) / (2.0D * 0.0040708D).$$

#### 4.3.5 Correzione radiometrica del mosaico e calcolo della temperatura superficiale

I risultati del calcolo sono stati confrontati con le misure di temperature superficiale ottenute durante i rilievi terrestri, al fine di verificare l'accuratezza della correzione; per evitare errori di sampling dei pixels sul mosaico termico e considerata l'omogeneità delle pavimentazioni su cui sono stati posizionati i target, viene utilizzato come valore di radianza al sensore la media su una finestra quadrata di 5x5 pixels centrata sulle coordinate da monografia.

I risultati ottenuti sono illustrati nella tabella 4.5, in cui la prima colonna rappresenta la temperatura apparente  $T_{app}$  del target sul mosaico termico originale e la seconda il corrispondente valore di radianza teorica di corpo nero  $L_S$ . La terza colonna contiene i valori di emissività del target stimati durante i rilievi terrestri, mentre la quarta riporta i valori ground radiance  $L_T$  (corretta per l'emissività e gli effetti atmosferici) da cui viene calcolata la temperatura superficiale corretta  $T$  riportata nella colonna successiva. Le ultime due colonne rappresentano la temperatura superficiale del target  $T_m$  misurata al suolo durante i rilievi terrestri e la differenza in °C tra i valori misurati a terra e quelli derivati dai mosaici termici.

Target	$T_{app}$ (°K)	$L_S$ (W/m <sup>2</sup> *sr <sup>-1</sup> )	$\epsilon$	$L_T$ (W/m <sup>2</sup> *sr <sup>-1</sup> )	T (°K)	$T_m$ (°K)	$\Delta T$ (°C)
TV01	4,9	48,61	0,97	48,04	4,1	5,4	1,3
TV02	5,9	49,42	0,98	48,87	5,2	5,2	0

TV04	6,6	49,99	0,91	51,91	8,9	8,8	-0,1
TV05	5,1	48,86	0,95	48,96	5,3	6,5	1,2
TV06	4,9	48,61	0,94	48,92	5,2	5,8	0,6
TV07	6,4	49,83	0,95	50,35	7,0	7,6	0,6
TV08	7,6	50,90	0,91	53,25	10,5	8,4	-2,1
TV10	4,6	48,45	0,90	49,95	6,5	7,4	0,9
TV11	5,9	49,42	0,97	49,17	5,5	5,9	0,4
TV12	6,3	49,75	0,91	51,55	8,4	9,0	0,6

*Tab. 4.5– Temperature superficiali rilevate a terra e derivate dalla correzione radiometrica (con  $\epsilon$  del nastro isolante = 0,95)*

La tabella 4.6, del tutto analoga alla precedente, mostra le differenze tra i valori misurati a terra e quelli ottenuti dalle immagini aeree nel caso per i rilievi terrestri venga considerato un valore di emissività efficace del nastro isolante utilizzato durante i rilievi terrestri più bassa del valore consigliato (0,85 anziché 0,95); la temperatura superficiale e l'emissività della superficie sono state ricalcolate in post-processing su tutti i target utilizzando le immagini termiche originali. Il valore più basso di emissività sembra minimizzare la differenza tra le temperature rilevate mediante termografia e le temperature misurate con termometro a contatto in alcuni test effettuati di recente e ancora in fase di elaborazione.

In tab. 4.7 si può come con la correzione atmosferica le temperature dei target calcolate sui mosaici termici si avvicinano sensibilmente a quelle misurate sul campo durante i rilievi terrestri: la differenza media tra le temperature, nel caso si consideri un emissività del nastro isolante pari al valore consigliato di 0,95, passa da 1,2°C a 0,34 °C. Considerando un'emissività del nastro pari a 0,85 invece la differenza media passa da 4,2 °C a 0,5°C. Se si considerano i valori assoluti invece la differenza media tra i valori misurati e quelli derivati dal



mosaico termico passa da 1,3°C a 0,8°C (per  $\epsilon_{\text{nastro}}=0,95$ ) e da 4,2°C a 0,9°C (per  $\epsilon_{\text{nastro}}=0,85$ ).

Target	$T_{\text{app}}$ (°C)	$L_S$ (W/m <sup>2</sup> *sr <sup>-1</sup> )	$\epsilon$	$L_T$ (W/m <sup>2</sup> *sr <sup>-1</sup> )	T (°C)	$T_m$ (°C)	$\Delta T$ (°C)
TV01	4,9	48,61	0,87	51,22	8,0	8,4	0,4
TV02	5,9	49,42	0,88	52,11	9,1	7,4	-1,7
TV04	6,6	49,99	0,82	55,37	12,9	11,8	-1,1
TV05	5,1	48,86	0,85	52,33	9,4	9,7	0,3
TV06	4,9	48,61	0,85	51,94	8,9	9,1	0,2
TV07	6,4	49,83	0,86	53,49	10,7	10,6	-0,1
TV08	7,6	50,90	0,83	56,42	14,1	11,7	-2,4
TV10	4,6	48,45	0,83	52,44	9,5	10,6	1,1
TV11	5,9	49,42	0,87	52,47	9,5	9,6	0,1
TV12	6,3	49,75	0,80	55,83	13,4	11,4	-2,0

*Tab. 4.6 – Temperature superficiali rilevate a terra e derivate dalla correzione radiometrica (con  $\epsilon$  del nastro isolante = 0,85)*

La tab. 4.8 mostra infine i risultati ottenuti variando il range spettrale utilizzato per l'integrazione dei termini radiometrici da 8-14  $\mu\text{m}$  a 8-16 $\mu\text{m}$  (corrispondente all'effettiva banda d'acquisizione del sensore termico): come si può vedere i risultati migliorano notevolmente, e le differenze medie passano da -4°C a 0,34 °C (per  $\epsilon_{\text{nastro}}=0,95$ ) e da -5,7°C a -0,5°C (per  $\epsilon_{\text{nastro}}=0,85$ ).

Target	$T_{\text{app}}$ (°C)	$\epsilon$	$T_m$ (°C)	$\Delta T$ (°C)	T (°C)	$\Delta T$ (°C)	$\epsilon$	$T_m$ (°C)	$\Delta T$ (°C)	T (°C)	$\Delta T$ (°C)
TV01	4,9	0,97	5,4	0,5	4,1	1,3	0,87	8,4	3,5	8,0	0,4
TV02	5,9	0,98	5,2	-0,7	5,2	0	0,88	7,4	1,5	9,1	-1,7
TV04	6,6	0,91	8,8	2,2	8,9	-0,1	0,82	11,8	5,2	12,9	-1,1
TV05	5,1	0,95	6,5	1,4	5,3	1,2	0,85	9,7	4,6	9,4	0,3

TV06	4,9	0,94	5,8	0,9	5,2	0,6	0,85	9,1	4,2	8,9	0,2
TV07	6,4	0,95	7,6	1,2	7,0	0,6	0,86	10,6	4,2	10,7	-0,1
TV08	7,6	0,91	8,4	0,8	10,5	-2,1	0,83	11,7	4,1	14,1	-2,4
TV10	4,6	0,90	7,4	2,8	6,5	0,9	0,83	10,6	6	9,5	1,1
TV11	5,9	0,97	5,9	0	5,5	0,4	0,87	9,6	3,7	9,5	0,1
TV12	6,3	0,91	9,0	2,7	8,4	0,6	0,80	11,4	5,1	13,4	-2
Media			1,2		0,34				4,2		-0,5

*Tab. 4.7 – Temp. apparenti sul mosaico termico, temp. derivate dalla correzione radiometrica e differenze con le temp. rilevate a terra con differenti valori di emissività del nastro isolante*

Target	T <sub>app</sub> (°K)	$\epsilon_{\text{nastro}} = 0,85$					$\epsilon_{\text{nastro}} = 0,95$				
		T <sub>m</sub> (°C)	Integr. 8-14 $\mu\text{m}$		Integr 8-16 $\mu\text{m}$		T <sub>m</sub> (°C)	Integr. 8-14 $\mu\text{m}$		Integr 8-16 $\mu\text{m}$	
			T (°C)	$\Delta T$ (°C)	T (°C)	$\Delta T$ (°C)		T (°C)	$\Delta T$ (°C)	T (°C)	$\Delta T$ (°C)
TV01	4,9	8,4	13,2	-4,8	8,0	0,4	5,4	8,4	-3,0	4,1	1,3
TV02	5,9	7,4	13,9	-6,5	9,1	-1,7	5,2	9,2	-4,0	5,2	0
TV04	6,6	11,8	18,1	-6,3	12,9	-1,1	8,8	13,3	-4,5	8,9	-0,1
TV05	5,1	9,7	14,7	-5	9,4	0,3	6,5	9,7	-3,2	5,3	1,2
TV06	4,9	9,1	14,3	-5,2	8,9	0,2	5,8	9,8	-4,0	5,2	0,6
TV07	6,4	10,6	15,6	-5	10,7	-0,1	7,6	11,1	-3,5	7,0	0,6
TV08	7,6	11,7	19,0	-7,3	14,1	-2,4	8,4	14,6	-6,2	10,5	-2,1
TV10	4,6	10,6	15,1	-4,5	9,5	1,1	7,4	11,5	-4,1	6,5	0,9
TV11	5,9	9,6	14,5	-4,9	9,5	0,1	5,9	9,6	-3,7	5,5	0,4
TV12	6,3	11,4	18,9	-7,5	13,4	-2,0	9,0	12,9	-3,9	8,4	0,6
Media				-5,7		-0,5			-4,0		0,34

*Tab. 4.8 – Differenze tra temperature rilevate a terra e temperature derivate dal mosaico termico al variare dell'intervallo d'integrazione con differenti valori di emissività del nastro isolante*

E' tuttora in corso la classificazione delle immagini iperspettrali

da parte di OGS, al fine di identificare i diversi materiali di copertura e assegnare loro un valore di emissività da utilizzare per il sensor model. Quando la classificazione sarà pronta il mosaico di temperatura apparente potrà essere interamente convertito, tramite la procedura precedentemente descritta, in un mosaico di temperatura superficiale da implementare nel SDSS.

## 5. Conclusioni

Il presente lavoro tratta di diversi aspetti del telerilevamento termico, a partire dalle tecnologie disponibili e dalle caratteristiche dei sensori sino a descrivere i diversi campi d'utilizzo e gli algoritmi utilizzati per differenti scopi legati ad applicazioni in ambito urbano.

Vengono trattati gli aspetti caratteristici della termografia satellitare, principalmente finalizzata allo studio dei bilanci energetici su diverse scale spaziali e all'analisi del fenomeno dell'Urban Heat Island, che ha interessato negli ultimi 40 anni un gran numero di studiosi: è stata descritta la sperimentazione effettuata sull'area urbana di Bologna tramite immagini satellitari del sensore ASTER installato sulla piattaforma Terra. I risultati, confermati da altri studi sulla stessa zona, confermano la presenza del fenomeno dell'UHI, anche se la sua entità risulta difficile da quantificare con precisione: è importante comunque evidenziare come per la valutazione dell'UHI sia più importante valutare le differenze nelle condizioni atmosferiche *near-ground* tra le aree urbane e rurali piuttosto che i valori assoluti di temperatura atmosferica o superficiale, che dipendono oltre che dalla periodo e dal tempo di acquisizione dei dati anche da una serie di fattori di difficile parametrizzazione legati alla notevole complessità del tessuto urbano.

Nello studio vengono analizzati poi le peculiarità, i limiti e le metodologie utilizzate per la termografia aerea, in questo caso finalizzata principalmente all'analisi dello stato di efficienza energetica degli edifici; vengono descritte nel dettaglio le operazioni svolte nell'ambito del progetto europeo EnergyCity, che mira a creare un sistema di supporto alle decisioni su piattaforma WebGIS a partire da mappe di temperatura

superficiale acquisite sulle città europee interessate dal progetto. E' risultato evidente come l'utilizzo di bande spettrali nell'Infrarosso termico in applicazioni di telerilevamento consenta, nel caso si applichino gli algoritmi di calcolo adeguati e si disponga di tutti i dati aggiuntivi necessari, di ricavare una serie di informazioni sullo stato termico delle superfici al suolo che sarebbe impossibile ottenere diversamente.

La scelta della piattaforma d'acquisizione, del sensore da utilizzare, delle modalità operative e degli algoritmi di calcolo dipende fortemente dagli scopi dell'analisi.

Per applicazioni in ambito urbano il fattore che risulta maggiormente importante è la risoluzione spaziale dei sensori: la tecnologia odierna purtroppo non consente l'utilizzo di immagini satellitari infrarosse per analisi su grande scala, in quanto la risoluzione disponibile (che risulta massima per il sensore ETM+, con pixel di 60 m) non è comparabile con la dimensione degli oggetti che si desidera risolvere (dell'ordine di qualche decina di metri al massimo). Di conseguenza, l'utilizzo di immagini satellitari è limitato ad analisi su scala locale, mentre per applicazioni a scala d'edificio bisogna ricorrere a rilievi aerei o terrestri.

L'utilizzo di immagini satellitari multispettrali con bande spettrali nell'infrarosso termico consente il calcolo della Land Surface Temperature su superfici anche molto vaste, con coperture al suolo di tipo differente, con una risoluzione temporale funzione del tempo di rivisitazione dell'immagine e con una complessità operativa dipendente dall'algoritmo utilizzato: esse possono quindi essere utilizzate con successo anche per analisi a scala regionale o globale.

L'utilizzo di sensori su piattaforma aerea consente di ottenere mappe termiche con risoluzioni spaziali notevolmente più elevate

(dipendenti in questo caso anche dalla quota di volo), ma naturalmente comportano dei costi maggiori a parità di superfici coperte, risultando applicabili solamente in analisi a scala locale e non regionale e rendendo oltremodo difficile la ripetibilità dei rilievi per analisi di *change detection*.

Nonostante l'utilizzo di piattaforme aeree equipaggiate con sensori termici ad elevate prestazioni consenta di creare mappe termiche con un'elevata risoluzione spaziale, la corretta quantificazione della temperatura superficiale e il suo utilizzo per l'analisi energetica degli involucri edilizi a scala d'edificio sono aspetti notevolmente complessi che risentono di diverse sorgenti d'errore; questi vanno dalle alterazioni radiometriche nei valori di radianza rilevata a causa degli effetti atmosferici, agli effetti delle proprietà fisico-geometriche dei materiali al suolo, alla complessa problematica della georeferenziazione delle immagini, sino alla questione di una corretta integrazione con la cartografia numerica che nel GIS contiene le informazioni legate agli edifici che risultano fondamentali per diversi tipi di analisi.

In particolare, per l'analisi dell'efficienza energetica degli edifici sono necessari, oltre che immagini infrarosse ad elevata risoluzione (metrica), una serie di informazioni aggiuntive necessarie alla corretta georeferenziazione delle stesse, al calcolo della temperatura superficiale e all'applicazione di modelli energetici per la valutazione delle prestazioni degli involucri edilizi. Va considerato inoltre che acquisizioni nadirali o quasi nadirali permettono di ottenere informazioni che riguardano solamente le coperture degli edifici, senza analizzare lo stato termico delle facciate verticali che li compongono. Sebbene l'acquisizione di immagini aeree con prese inclinate teoricamente sia possibile, è anch'essa legata a notevoli limitazioni fondamentalmente dovute agli effetti direzionali sull'emissività

che complicano ulteriormente il calcolo della temperatura corretta delle coperture. Per una esecuzione ottimale dei rilievi è necessario inoltre disporre, oltre che di una strumentazione adeguata per gli scopi che ci si prefigge, anche di un'accurata pianificazione delle operazioni di rilievo, di personale preparato e di condizioni metereologiche adeguate. Infine, risulta di notevole importanza anche la collezione di dati di verità a terra, che consentono di valutare l'accuratezza delle correzioni apportate alle immagini e la correttezza degli algoritmi di calcolo utilizzati.

In ogni caso, sia per le analisi satellitari che per quelle aeree, un fattore di fondamentale importanza è la conoscenza dei parametri fisici che caratterizzano gli oggetti che compongono le scene, in quanto la correzione delle immagini per gli effetti atmosferici consente sì di ricavare dalla radianza rilevata la *Brightness Temperature*, ma non permette di trasformare quest'ultima in valori di temperatura cinetica.

Il principale parametro fisico che caratterizza le superfici osservate è l'emissività dei pixel della scena, che va stimato con sufficiente precisione in quanto anche piccole variazioni influiscono grandemente sui valori di temperatura superficiale corretta derivante dalla radianza rilevata al sensore. E' da evidenziare come nel caso di immagini satellitari i pixel siano composti solitamente da una molteplicità di materiali diversi, e perciò la stima dell'emissività si basi solitamente su relazioni empiriche che considerano la copertura mista dei pixels: diversi autori propongono di stimare il valore di emissività da parametri tipicamente utilizzati in telerilevamento, come il Normalized Difference Vegetation Index (*NDVI*).

Il metodo proposto nella sperimentazione per la stima dei valori di Land Surface Emissivity (*LSE*) è anch'esso basato sui valori

dell'NDVI: è abbastanza rapido, e permette di ottenere una risoluzione spaziale dell'immagine finale di temperatura superficiale notevolmente maggiore rispetto a quella ottenibile utilizzando le sole bande spettrali nel termo-infrarosso; è inoltre da sottolineare come questo metodo possa essere utilizzato con qualsiasi sensore multispettrale avente almeno una banda nel campo dell'infrarosso termico (oltre alle bande del rosso e del NIR), mentre altri algoritmi come il TES (sviluppato appositamente per l'utilizzo con immagini ASTER) necessitano di almeno 4 bande TIR su lunghezze d'onda diverse.

Per immagini termiche derivate da piattaforma aerea invece la risoluzione spaziale è notevolmente più elevata, e i pixels possono risultare perciò maggiormente omogenei al loro interno: la stima dell'emissività in questo caso è però complicata dagli effetti direzionali (che invece risultano meno influenti nelle immagini satellitari) e dalla dipendenza che essa presenta, oltre che dal tipo di materiale, anche da altri diversi fattori (come la rugosità, lo stato d'usura, il contenuto d'umidità). Di conseguenza valori di emissività tabellari derivati da letteratura o da prove di laboratorio sono da utilizzare con la dovuta attenzione.

Tra gli sviluppi futuri della tesi, per quanto riguarda il fenomeno dell'UHI nella città di Bologna, è prevista l'analisi di osservazioni georiferite di temperature atmosferica ottenute durante alcune campagne di rilievo terrestre tramite dei dispositivi di misura dei principali parametri atmosferici (temperatura dell'aria, umidità relativa) installati, in combinazione con ricevitori GNSS, su veicoli mobili che percorreranno ripetutamente dei transetti all'interno dell'area urbana, coprendo zone con differente uso del suolo e condizioni ambientali.



Per quanto riguarda le attività del progetto EnergyCity, oltre a completare la sperimentazione sull'area di Treviso con la classificazione delle immagini iperspettrali, l'assegnazione dei valori di emissività alle superfici e il successivo calcolo della temperatura cinetica delle coperture per la creazione di mosaici di temperatura superficiale, verranno completati i rilievi previsti sulle diverse città, che saranno interessate poi dalle diverse fasi di processing in maniera del tutto analoga a quanto descritto nel capitolo quattro.

## 6. Bibliografia

- Allinson, D. (2007) - Evaluation of aerial thermography to discriminate loft insulation in residential housing, PhD thesis, University of Nottingham.
- Arnfield, A.J. (2002) - Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchange of energy and water, and the urban heat island. *Intern. Journal of Climatology*, 23: 1–26
- Smith, R.B. (2005), “Computing the Planck Function”, CEO, Yale University, 4 pp.
- ASHRAE (1993) - ASHRAE Handbook – Fundamentals, American society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta
- ASTM, E 1933-99a (2002) - Standard test methods for measuring and compensating for emissivity using infrared imaging radiometers. E2758 Standard Guide for Selection and Use of Wideband, Low Temperature Infrared Thermometers.
- Becker, F. (1980) - In Remote sensing application in agricultural and hydrology (G. Frayse, Ed.),
- Becker, F. and Li, Z.L. (1990) - Temperature-independent spectral indices in thermal infrared bands, *Remote Sensing of Environment*, 32, pp. 17-33
- Bitelli G., Conte P. (2011a) - Thermal Remote Sensing at Urban Scale: applications and a case study, in “Geomatica: le radici del futuro”, A. Manzano & A. Spalla eds., ed. SIFET, pp. 27-34
- Bitelli G., Conte P. (2011b) - Techniques, tools and workflow for remote sensed roof temperature mapping in some cities across Central Europe”, *Proceedings 17th International Conference “Building Services, Mechanical and Building Industry Days”* –

- Urban Energy Conference, Debrecen, 13-14 October 2011, pp. 49-56, BME Budapest
- Brivio P.A., Lechi G., Zilioli E. (2006) – Principi e metodi di telerilevamento, CittàStudi edizioni, Torino
- Brown, R.J. & Cilhar, J. (1978) - Introduction to aerial thermography applications in energy conservation programs, Canada Centre for Remote Sensing report: 78-2
- Carlson, T.N. and Ripley, D.A. (1997) - On the relation between NDVI, fractional vegetation cover and leaf area index, Remote Sensing of Environment, 62, pp. 241-252
- Clarke, J. A. (2001) - Energy simulation in Building design, Butterworth-Heinemann
- Coolbaugh et al. (2007) - Detection of geothermal anomalies using ASTER thermal infrared images at Bradys Hot Springs, Nevada USA - Remote Sensing of Environment 106, pp. 350–359.
- Daryabeigi, K., Wright, R. E., Puram, C. K. and Alderfer, D. W. (1992) - Directional emittance corrections for thermal infrared imaging, Thermosense XIV: An International Conference on Thermal Sensing and Imaging Diagnostic Applications, Orlando, Florida, USA, J.K. Eklund, SPIE Vol. 1682, pp. 325-335, 1992.
- Eneva M., Coolbaugh M. (2009) - Importance of elevation and temperature inversions for the interpretation of thermal infrared satellite images used in geothermal exploration. GRC Transactions, Vol. 33, pp. 467-470
- Environmental Protection Agency's Office of Atmospheric Programs (2008) - Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies: <http://www.epa.gov/heatild/about/index.htm>

- Gallo, K.P., J.D. Tarpley, A.L. McNab, and T.R. Karl, (1995). Assessment of urban heat islands: a satellite perspective. *Atmospheric Research*, 37, pp.37-43.
- Gillespie, A.R., Rokugawa, S., Hook, S., Matsunaga, T., Kahle, A.B.,(1998) - A temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36, 1113–1126
- Goldstein, R.J. (1978) - Application of aerial infrared thermography data to the measurement of building heat loss, *ASHRAE Transactions: Focus on Energy*, Atlanta, GA, USA, *ASHRAE Vol. 84, Part 1*, pp. 207-226
- Hay, G.J., Kyle C., Hemachandran B., Chen G., Rahman M.M., Fung T.S., Arvai J.L., (2011) - Geospatial Technologies to Improve Urban Energy Efficiency - *Remote Sensing*, 3(7), pp. 1380-1405
- Soushi Kato, Yasushi Yamaguchi (2005) - Analysis of urban heat-island effect using ASTER and ETM+ Data: Separation of anthropogenic heat discharge and natural heatradiation from sensible heat flux. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 99, 1–2, pp. 44–54
- Kawashima, S., Tomoyuki I. Mitsuo M., Tetsuhisa M. (2000) - Relations between surface temperature and air temperature on a local scale during winter nights - *J. Appl. Meteor.*, 39, 1570–1579.
- Kealy, P.S., and Hook, S.J. (1993) - Separating temperature and emissivity in thermal infrared multispectral scanner data: Implications for recovering land surface temperatures. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 31, No.

6, 1155-1164

Lanzoni, D., (2010) - Diagnosi e certificazione energetica: prove strumentali sugli edifici. Maggioli Editore

Lee, H.Y.(1993) - An application of NOAA AVHRR thermal data to the study of urban heat islands. Atmospheric Environment B 27,1-13.

Lu, D. & Weng, Q. (2006) - Spectral mixture analysis of ASTER images for examining the relationship between urban thermal features and biophysical descriptors in Indianapolis, Indiana, USA, Remote Sensing of Environment, 104, 2, 157-167.

Oke, T.R. (1973) - City size and the urban heat island. Atmospheric Environment, 7: 769-779.

Oke, T.R. (1982) - The Energetic Basis of the Urban Heat Island. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 108:1-24.

Price, J. C. (1979) - Assessment of the Urban Heat Island Effect Through the Use of Satellite Data. Mon. Weather Rev., 107, pp. 1554-1557

Quattrocchi, D.A, Luvall, J.C, (2000) - Thermal Remote Sensing in Land Surface Processes - CRC Press

RayMan: Modelling radiation fluxes, mean radiant temperature and thermal indices in simple and complex environments (<http://www.mif.uni-freiburg.de/rayman/index.htm>)

Schott, J.R. & Wilkinson, E.P. (1981) - Quantitative methods in aerial thermography, Thermosense IV: Thermal Infrared Sensing Applied to Energy Conservation in Building Envelopes, Ottawa, Canada, R.A. Grot and J.T. Wood, SPIE Vol. 313, pp. 20-27

Schott, J.R., Biegel, J.D. and Wilkinson, E. (1982) - Quantitative

- aerial survey of building heat loss, Thermosense V: Thermal Infrared Sensing Diagnostics, Detroit, USA, G.E. Courville, SPIE Vol. 0371, pp. 187-194
- Schott, J.R. (1997) - Remote sensing – The image chain approach, Oxford University Press, New York
- Small, C. (2006) - Comparative analysis of urban reflectance and surface temperature, Thermal Remote Sensing of Urban Areas, Remote Sensing of Environment, Vol. 104, 2, 168-189
- Smith, R.B. (2005) - Computing the Planck Function, CEO, Yale University, 4 pp.
- Snyder, W. C. & Schott, J. R. (1994) - A combined aerial and ground technique for assessing structural heat loss, Thermosense XVI: An International Conference on Thermal Sensing and Imaging Diagnostic Applications, Orlando, USA, SPIE Vol. 2245, pp. 71-82.
- Stockton, G.R. & Tache, A. (2006) - Advances in Applications for Aerial Infrared Thermography – Proceedings SPIE Thermosense XXVIII (J.J. Miles, G.R. Peacock, K.M. Knettel eds), Vol. 6205
- Treado, S.J. & Burch, J.M. (1983) - Applications of aerial thermography for residential energy analysis, ASHRAE Transactions, Washington, D.C., USA, ASHRAE Vol. 83 Part 2B, pp. 95-101
- Valor, E., and Caselles, V. (1996) - Mapping Land Surface Emissivity from NDVI: Application to European, African, and South American Areas, Remote Sensing of Environment, 57, 167-184
- Van, T.T., Trung, L.V., Lan, H.T. (2009) - Application of Thermal Remote Sensing in Study on Surface Temperature Distribution of Ho Chi Minh City. 7th FIG Regional

Conference, Hanoi

- Van De Griend, A. A. and Owe, M. (1993) - On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces, *International Journal of Remote Sensing*, 14(6), 1119 – 1131
- Ventura, F., Gaspari, N., Piana, S., Rossi Pisa, P. (2009) - Variazione dell'isola di calore urbana sulla città di Bologna negli ultimi 30 anni. Atti del XII Convegno AIAM, "Clima e agricoltura, strategie di adattamento e mitigazione", Sassari 15-17/6/2009, *Italian Journal of Agrometeorology*, 14 (2), 22-23.
- Voogt, J.A. and Oke T.R. (2003) - Thermal remote sensing of urban climates, *Remote Sensing of Environment*, 86, 370–384.
- Weng, Q. (2009) - Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64, 4, 335-344
- Williams, T.L. (2009) - *Thermal Imaging Cameras. Characteristics and performance* – CRC Press
- Yang, H. and Liu, Y. (2005) - A remote sensing study of urban heat island effect in Lanzhou City, Northwest China, *Proc. 3rd International Symposium Remote Sensing and Data Fusion Over Urban Areas and 5th International Symposium Remote Sensing of Urban Areas*, 6 pp.
- Young, S. J., Johnson, B.R., Hackwell, J.A. (2002) - An in-scene method for atmospheric compensation of thermal hyperspectral data, *Journal of Geophysical Research*
- Zauli Sajani S., Scotto F. (2007) - Studio del fenomeno dell'isola di calore - Area urbana di Bologna:  
[http://www.arpa.emr.it/cms3/documenti/calore/Isola\\_calore\\_Bol](http://www.arpa.emr.it/cms3/documenti/calore/Isola_calore_Bol)

ogna.pdf



**ALLEGATO 1 : Monografie dei punti rilevati durante il rilievo  
terrestre di Treviso (19/02/2011)**

**Test site: TREVISO - ITALY**

**Point: TV01**

**Location:** Piazza della Vittoria, Monumento ai caduti, North-East corner of the basement

**Environment/Material:** Type 11

**Notes:**

**Positioning (accuracy = ±30 cm)**

**WGS84** lat 45.6632394° - 45° 39' 47.66" lon 12.2426476° - 12° 14' 33.53"

H<sub>ell</sub> = 62.78 m

**UTM-WGS84** N 5060330.39 E 285202.07 (zone 33N)

**UTM-ED50** N 5060523.21 E 285272.80 (zone 33N)

**Surface Temperature/Emissivity measurements**

**Surface:** horizontal, pavement

**Height ref. ground:** ground level

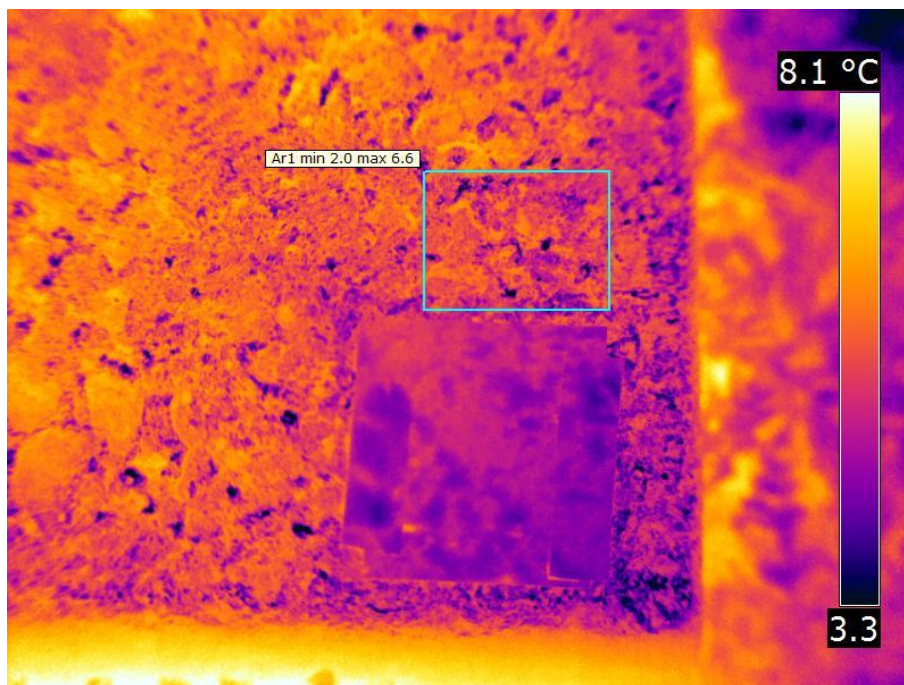
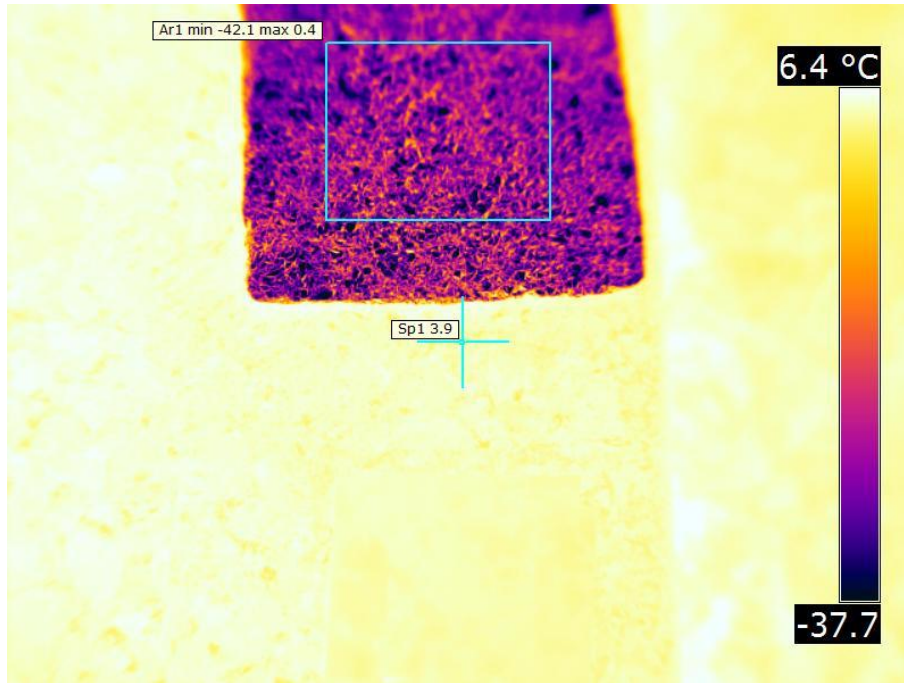
**Hour:** 19:48 19/02/2011

**Instrument:** Thermal camera FLIR B620, Psychrometer

**Filename(s):** TV01.jpeg, TV01a.jpeg



Filename(s):	IR-TV01.jpeg, IR-TV01a.jpeg		
Dry-bulb temperature:	7,5°	Water vapor content:	65%



Reflected temperature	Surface temperature of high emissivity tape	Surface Emissivity	Surface Temperature
-25,5°	5,3°	0,97	5,4°



**Test site: TREVISO - ITALY**

**Point: TV02**

**Location:** Piazza della Vittoria, Monumento ai caduti, South-East corner of the basement

**Environment/Material:** Type 11

**Notes:**

**Positioning (accuracy =  $\pm 30$  cm)**

**WGS84** lat 45.6630440° - 45° 39' 46.96" lon 12.2426185° - 12° 14' 33.43"

H<sub>ell</sub> = 62.75 m

**UTM-WGS84** N 5060308.76 E 285199.06 (zone 33N)

**UTM-ED50** N 5060501.58 E 285269.79 (zone 33N)

**Surface Temperature/Emissivity measurements**

**Surface:** horizontal, pavement

**Height ref. ground:** ground level

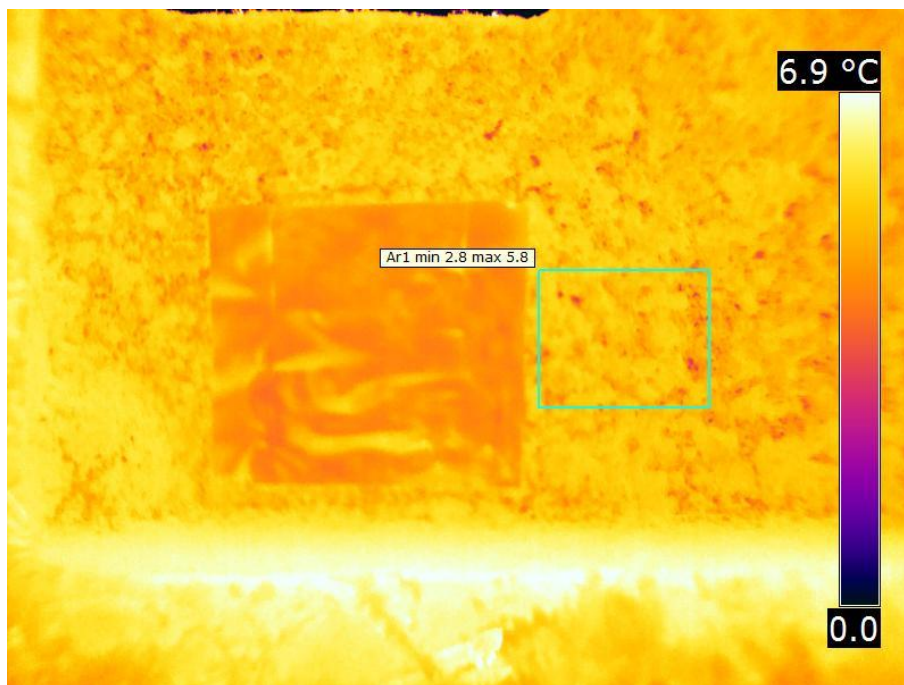
**Hour:** 19:42 19/02/2011

**Instrument:** Thermal camera FLIR B620, Psychrometer

**Filename(s):** TV02.jpeg, TV02a.jpeg



Filename(s):	IR-TV02.jpeg, IR-TV02a.jpeg		
Dry-bulb temperature:	7,7	Water vapor content:	65%



Reflected temperature	Surface temperature of high emissivity tape	Surface Emissivity	Surface Temperature
-19,2°	5,1°	0,98	5,2°



**Test site: TREVISO - ITALY**

**Point: TV04**

**Location:** Via Luigi Giacomelli, forecourt of the Biblioteca Comunale GiL

**Environment/Material:** Type 9

**Notes:**

**Positioning (accuracy =  $\pm 30$  cm)**

**WGS84** lat 45.6659989° - 45° 39' 57.60" lon 12.2380233° - 12° 14' 16.88"

H<sub>ell</sub> = 61.31 m

**UTM-WGS84** N 5060649.39 E 284852.42 (zone 33N)

**UTM-ED50** N 5060842.20 E 284923.15 (zone 33N)

**Surface Temperature/Emissivity measurements**

**Surface:** horizontal, pavement

**Height ref. ground:** ground level

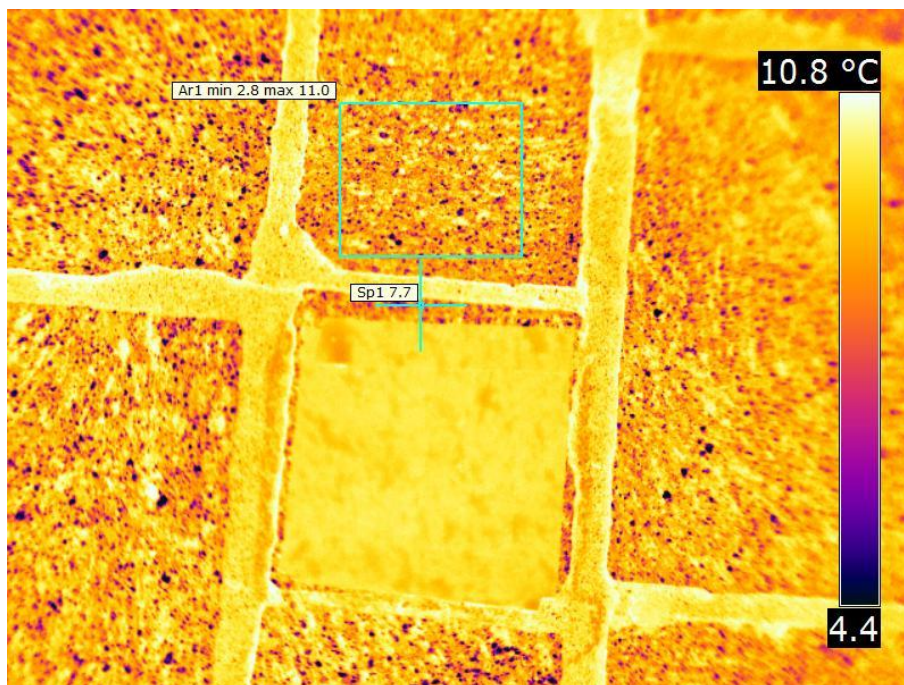
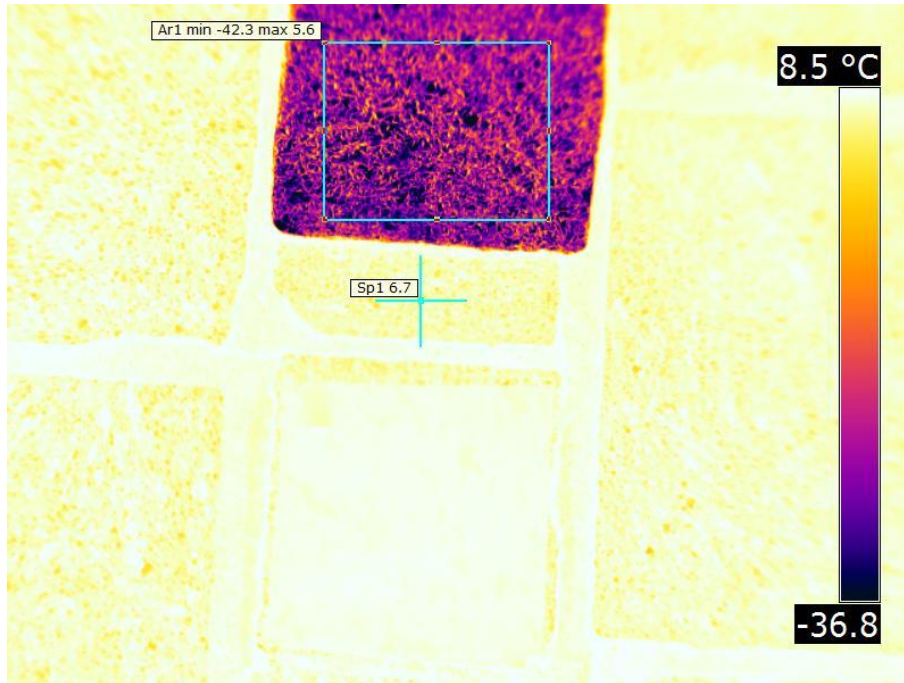
**Hour:** 20:02 19/02/2011

**Instrument:** Thermal camera FLIR B620, Psychrometer

**Filename(s):** TV04.jpeg, TV04a.jpeg



Filename(s):	IR-TV04.jpeg, IR-TV04a.jpeg		
Dry-bulb temperature:	6,2°	Water vapor content:	75%



Reflected temperature	Surface temperature of high emissivity tape	Surface Emissivity	Surface Temperature
-24,3°	8,7°	0,91	8,8°



**Test site: TREVISO - ITALY**

**Point: TV05**

**Location:** Via Mura di San Teonisto, forecourt of the Liceo Ginnasio Statale A. Canova

**Environment/Material:** Type 12

**Notes:**

**Positioning (accuracy =  $\pm 30$  cm)**

**WGS84** lat 45.6655198° - 45° 39' 55.87" lon 12.2356613° - 12° 14' 08.38"

H<sub>ell</sub> = 61.83 m

**UTM-WGS84** N 5060602.51 E 284666.60 (zone 33N)

**UTM-ED50** N 5060795.33 E 284737.33 (zone 33N)

### Surface Temperature/Emissivity measurements

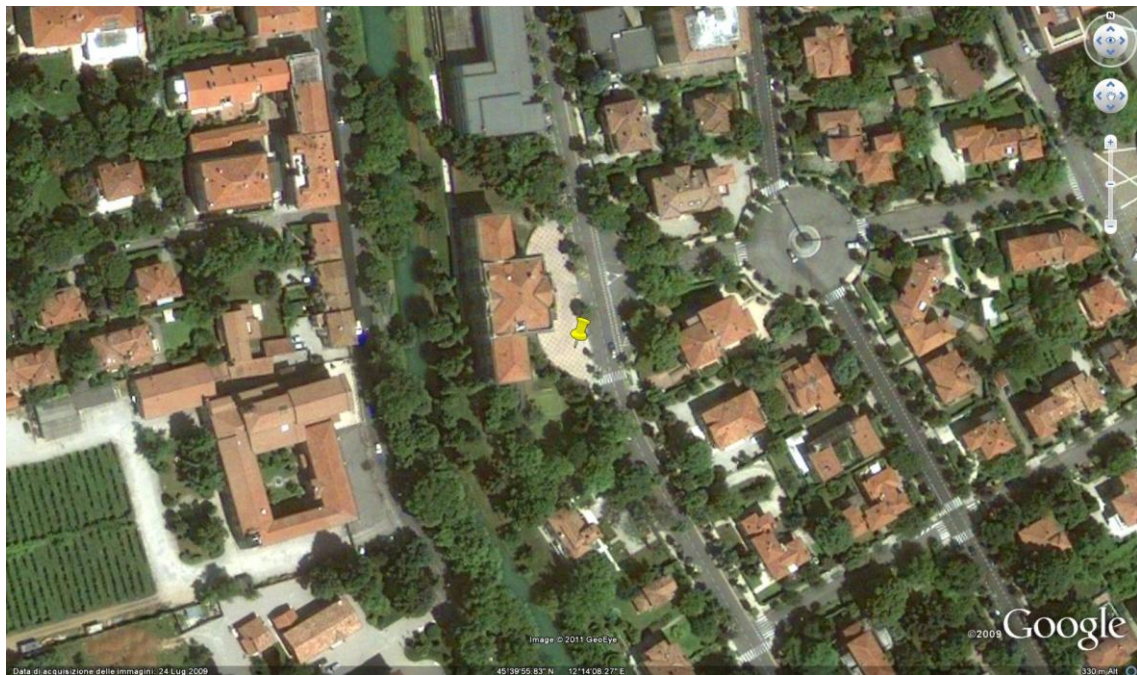
**Surface:** horizontal, pavement

**Height ref. ground:** ground level

**Hour:** 20:15 19/02/2011

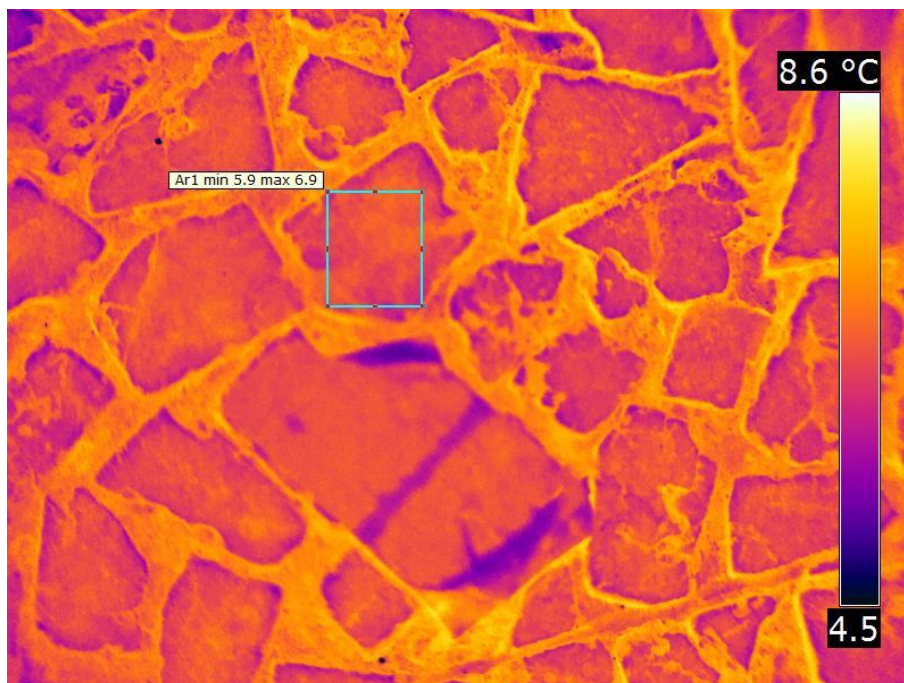
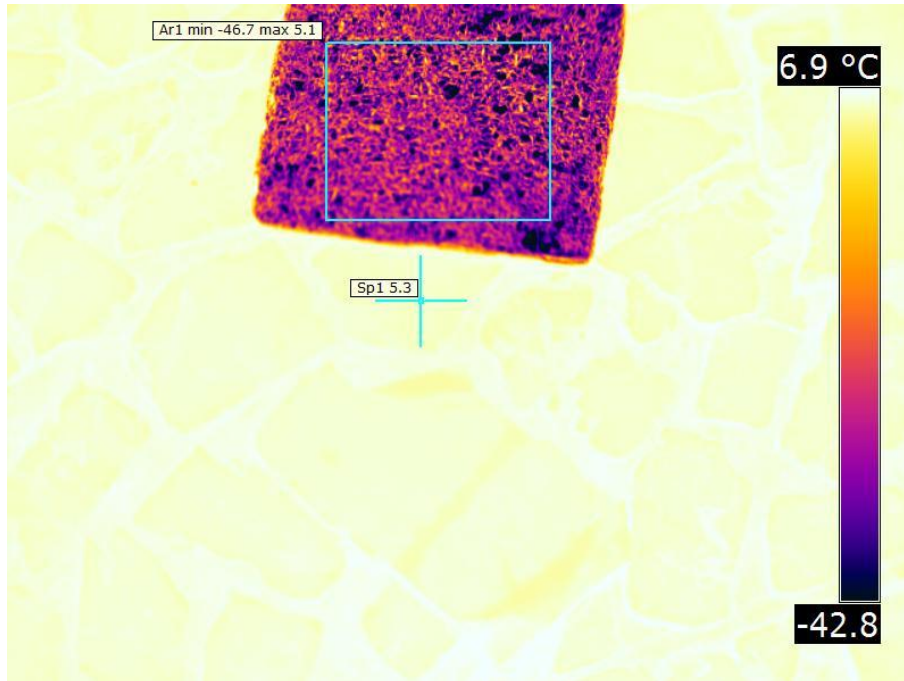
**Instrument:** Thermal camera FLIR B620, Psychrometer

**Filename(s):** TV05.jpeg, TV05a.jpeg





Filename(s):	IR-TV05.jpeg, IR-TV05a.jpeg		
Dry-bulb temperature:	6,6°	Water vapor content:	73%



Reflected temperature	Surface temperature of high emissivity tape	Surface Emissivity	Surface Temperature
-27,3°	6,5°	0,95	6,6°

**Test site: TREVISO - ITALY**

**Point: TV06**

**Location:** Viale Bartolomeo D'Alviano, North-West bastion

**Environment/Material:** Type 8

**Notes:**

**Positioning (accuracy = ± 30 cm)**

**WGS84** lat 45.6687456° - 45° 40' 07.48" lon 12.2346644° - 12° 14' 04.79"

H<sub>ell</sub> = 65.25 m

**UTM-WGS84** N 5060963.57 E 284601.33 (zone 33N)

**UTM-ED50** N 5061156.39 E 284672.05 (zone 33N)

**Surface Temperature/Emissivity measurements**

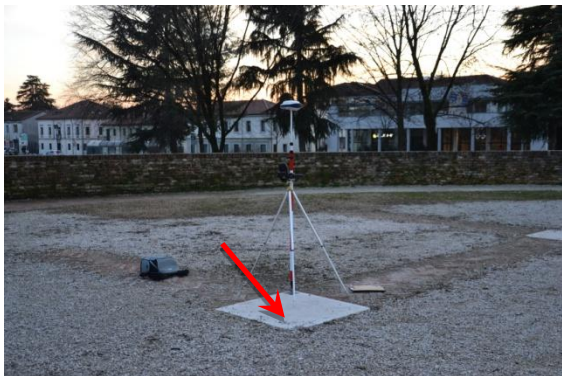
**Surface:** horizontal, pavement

**Height ref. ground:** ground level

**Hour:** 20:33 19/02/2011

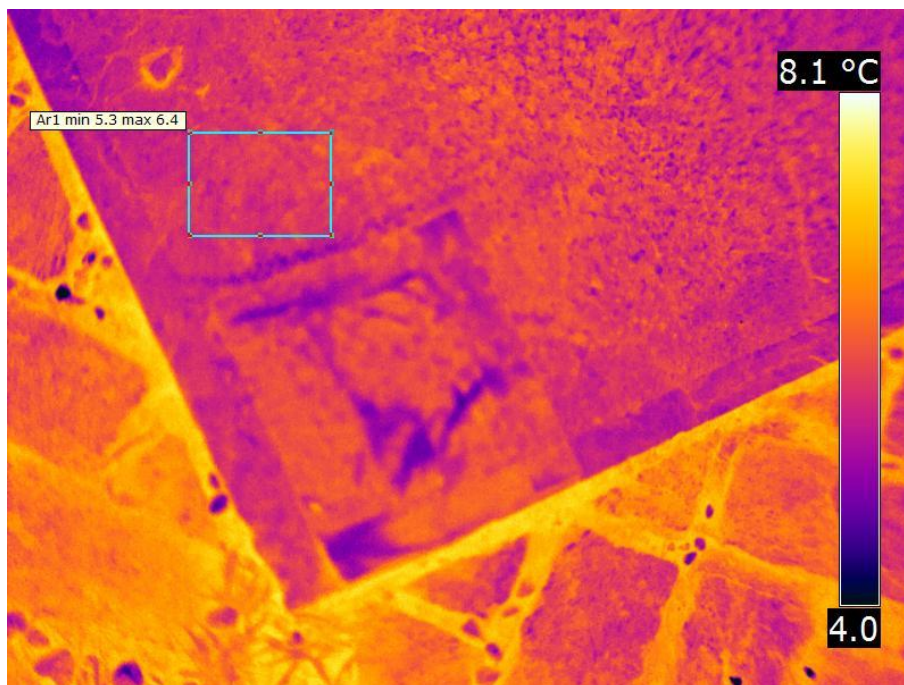
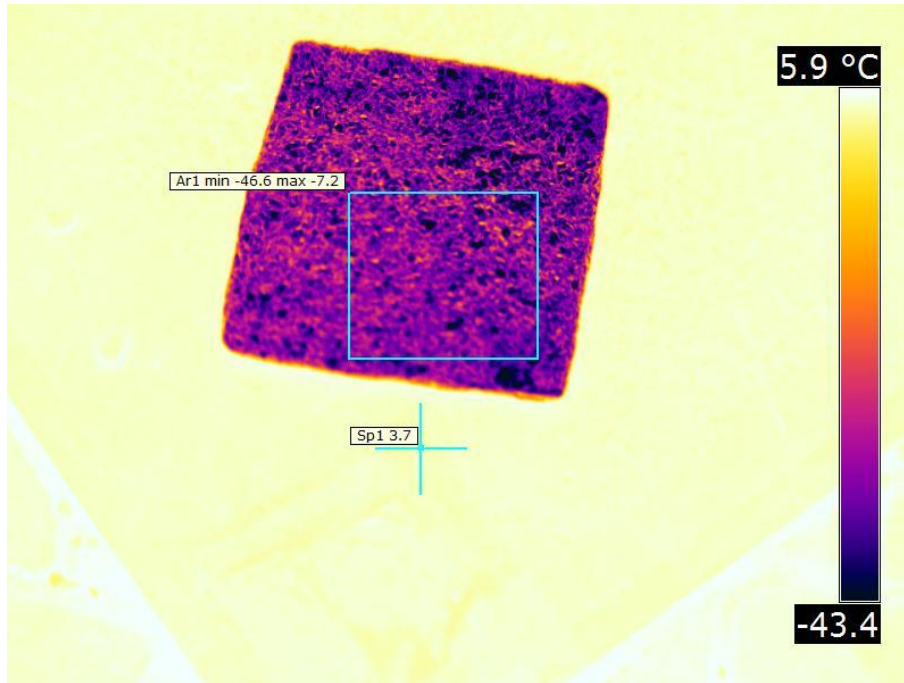
**Instrument:** Thermal camera FLIR B620, Psychrometer

**Filename(s):** TV06.jpeg, TV06a.jpeg





Filename(s):	IR-TV06.jpeg, IR-TV06a.jpeg		
Dry-bulb temperature:	6,6°	Water vapor content:	77%



Reflected temperature	Surface temperature of high emissivity tape	Surface Emissivity	Surface Temperature
-31,5°	5,7°	0,94	5,8°

**Test site: TREVISO - ITALY**

**Point: TV07**

**Location:** Porta Santi Quaranta (Viale Guglielmo Oberdan), on the street

**Environment/Material:** Type 1

**Notes:**

**Positioning (accuracy = ± 30 cm)**

**WGS84** lat 45.6669818° - 45° 40' 01.13" lon 12.2345336° - 12° 14' 04.32"

H<sub>ell</sub> = 63.13 m

**UTM-WGS84** N 5060767.97 E 284584.37 (zone 33N)

**UTM-ED50** N 5060960.79 E 284655.09 (zone 33N)

**Surface Temperature/Emissivity measurements**

**Surface:** horizontal, pavement

**Height ref. ground:** ground level

**Hour:** 20:22 19/02/2011

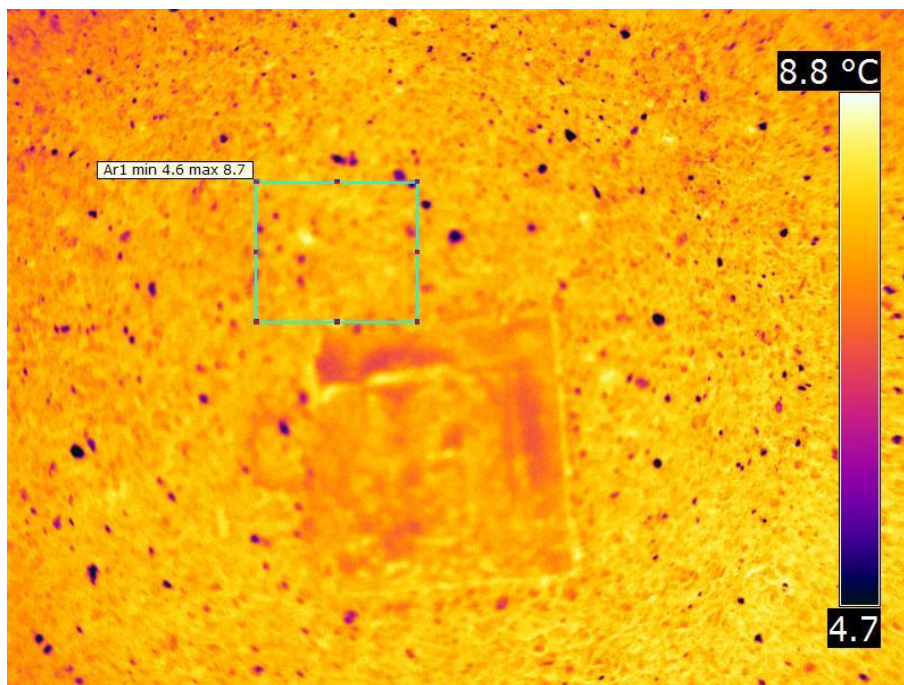
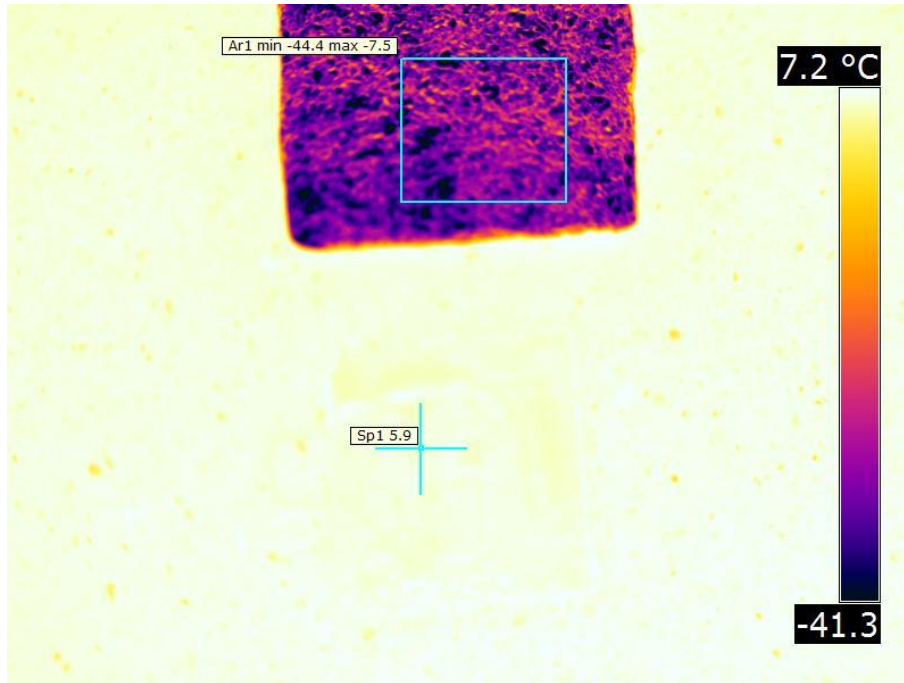
**Instrument:** Thermal camera FLIR B620, Psychrometer

**Filename(s):** TV07.jpeg, TV07a.jpeg





<b>Filename(s):</b>	IR-TV07.jpeg, IR-TV07a.jpeg		
<b>Dry-bulb temperature:</b>	5,2°	<b>Water vapor content:</b>	72%



Reflected temperature	Surface temperature of high emissivity tape	Surface Emissivity	<b>Surface Temperature</b>
-29,7°	7,5°	0,95	<b>7,6°</b>

**Test site: TREVISO - ITALY**

**Point: TV08**

**Location:** Piazza Duca D'Aosta, on the safety island in front of the train station

**Environment/Material:** Type 4

**Notes:**

**Positioning (accuracy =  $\pm 30$  cm)**

**WGS84** lat 45.6604982° - 45° 39' 37.79" lon 12.2457256° - 12° 14' 44.61"

H<sub>ell</sub> = 62.10 m

**UTM-WGS84** N 5060017.60 E 285431.37 (zone 33N)

**UTM-ED50** N 5060210.41 E 285502.10 (zone 33N)

**Surface Temperature/Emissivity measurements**

**Surface:** horizontal, pavement

**Height ref. ground:** ground level

**Hour:** 20:50 19/02/2011

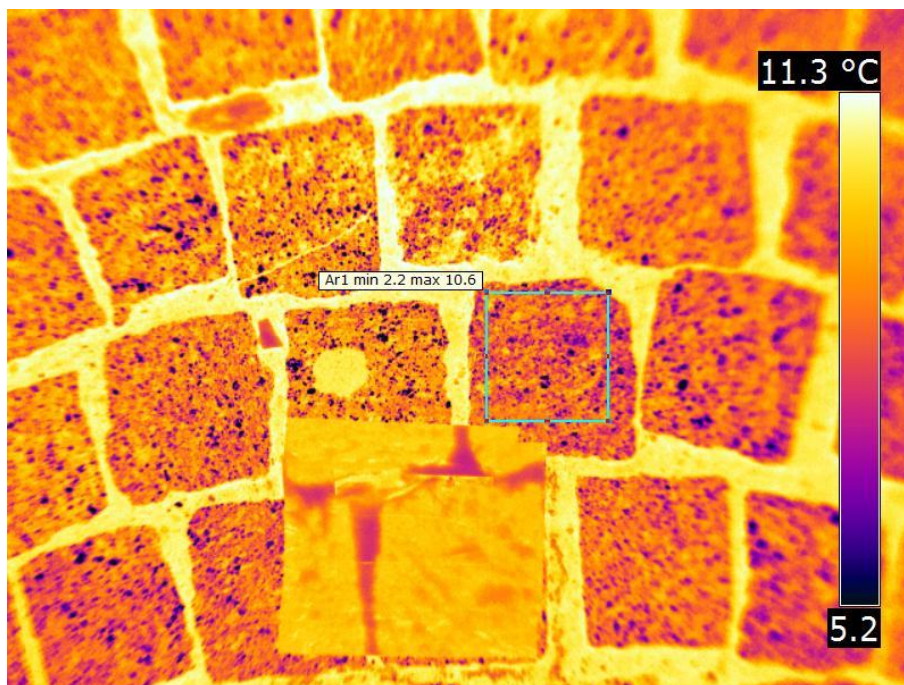
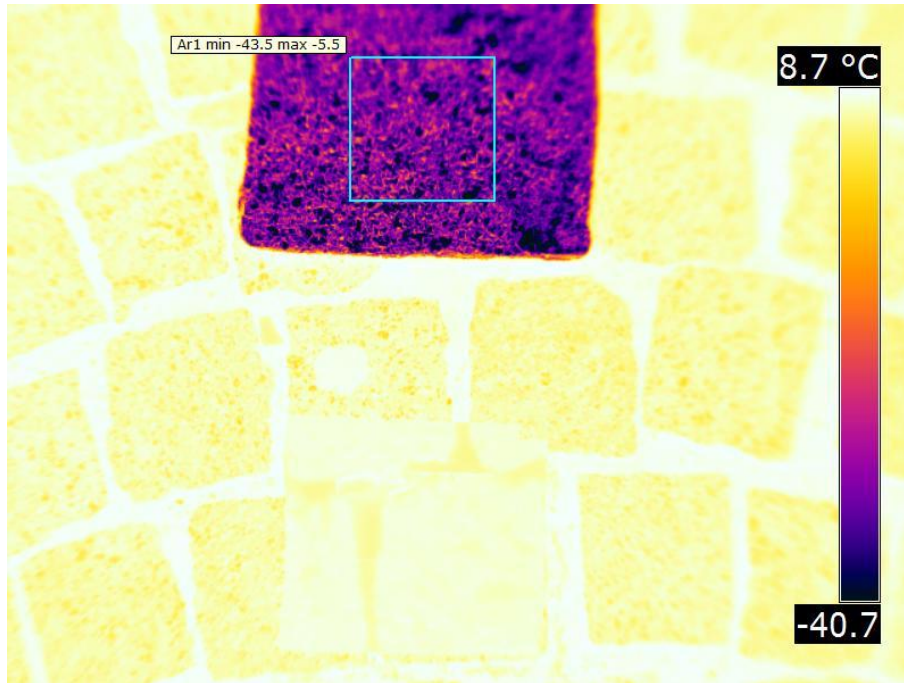
**Instrument:** Thermal camera FLIR B620, Psychrometer

**Filename(s):** TV08.jpeg, TV08a.jpeg





Filename(s):	IR-TV08.jpeg, IR-TV08a.jpeg		
Dry-bulb temperature:	6,5°	Water vapor content:	68%



Reflected temperature	Surface temperature of high emissivity tape	Surface Emissivity	Surface Temperature
-29,6°	8,4°	0,91	8,4°

**Test site: TREVISO - ITALY**

**Point: TV10**

**Location:** Via Carlo Alberto, parking entrance in front of the newsstand

**Environment/Material:** Type 4

**Notes:**

**Positioning (accuracy =  $\pm 30$  cm)**

**WGS84** lat 45.6658337° - 45° 39' 57.00" lon 12.2546640° - 12° 15' 16.79"

H<sub>ell</sub> = 58.92 m

**UTM-WGS84** N 5060586.44 E 286148.02 (zone 33N)

**UTM-ED50** N 5060779.26 E 286218.76 (zone 33N)

**Surface Temperature/Emissivity measurements**

**Surface:** horizontal, pavement

**Height ref. ground:** ground level

**Hour:** 18:40 19/02/2011

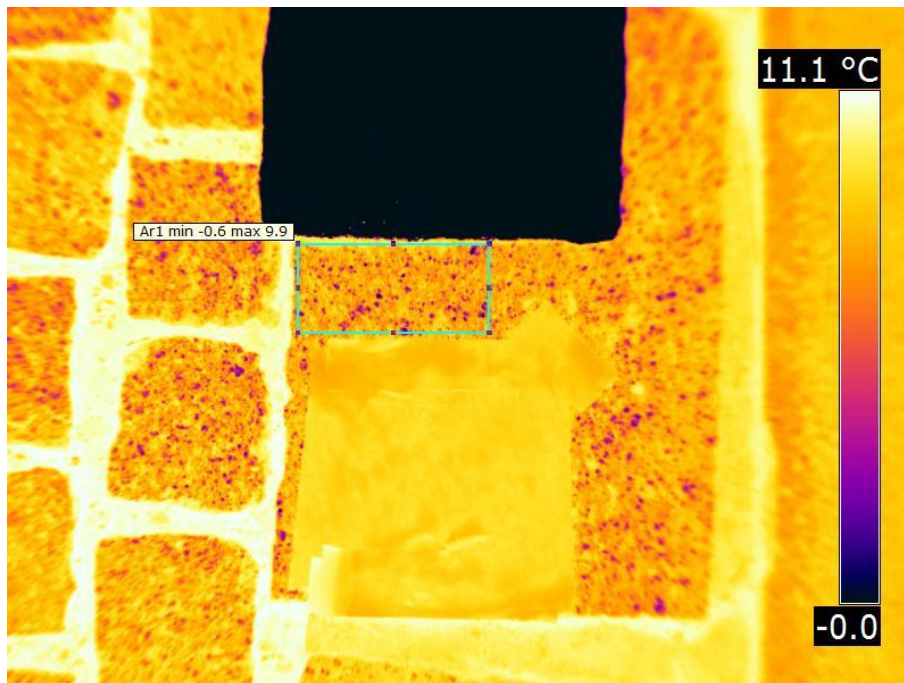
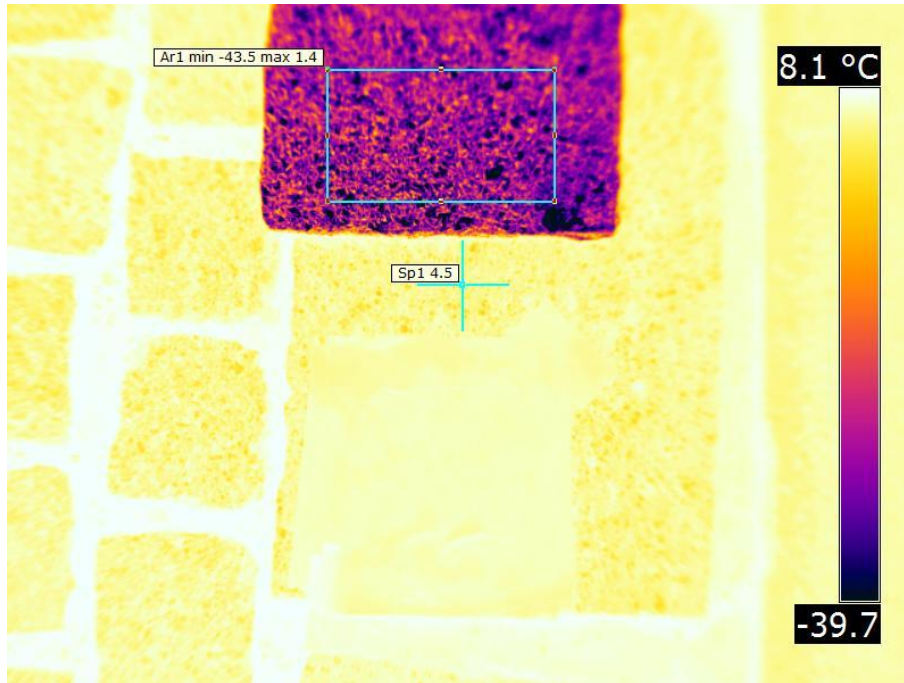
**Instrument:** Thermal camera FLIR B620, Psychrometer

**Filename(s):** TV10.jpeg, TV10a.jpeg





Filename(s):	IR-TV10.jpeg, IR-TV10a.jpeg		
Dry-bulb temperature:	8,3°	Water vapor content:	65%



Reflected temperature	Surface temperature of high emissivity tape	Surface Emissivity	Surface Temperature
-26,2°	7,5°	0,90	7,4°

**Test site: TREVISO - ITALY**

**Point: TV11**

**Location:** Piazzetta Mario Botter, forecourt of S. Caterina Church

**Environment/Material:** Type 6

**Notes:**

**Positioning (accuracy = ± 30 cm)**

**WGS84** lat 45.6667201° - 45° 40' 00.19" lon 12.2507403° - 12° 15' 02.66"

H<sub>ell</sub> = 59.44 m

**UTM-WGS84** N 5060695.40 E 285845.77 (zone 33N)

**UTM-ED50** N 5060888.22 E 285916.50 (zone 33N)

**Surface Temperature/Emissivity measurements**

**Surface:** horizontal, pavement

**Height ref. ground:** ground level

**Hour:** 19:10 19/02/2011

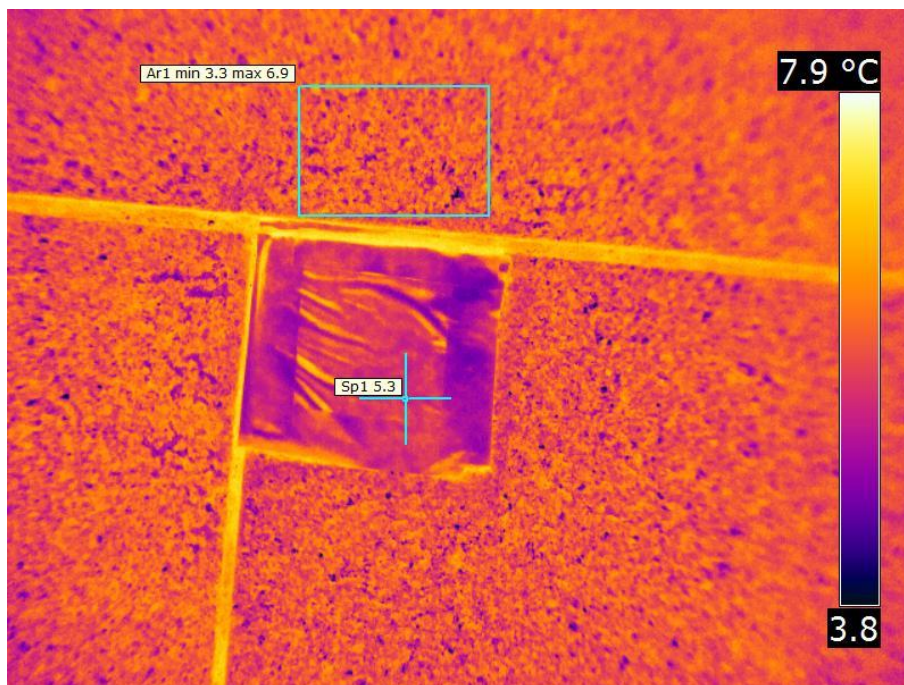
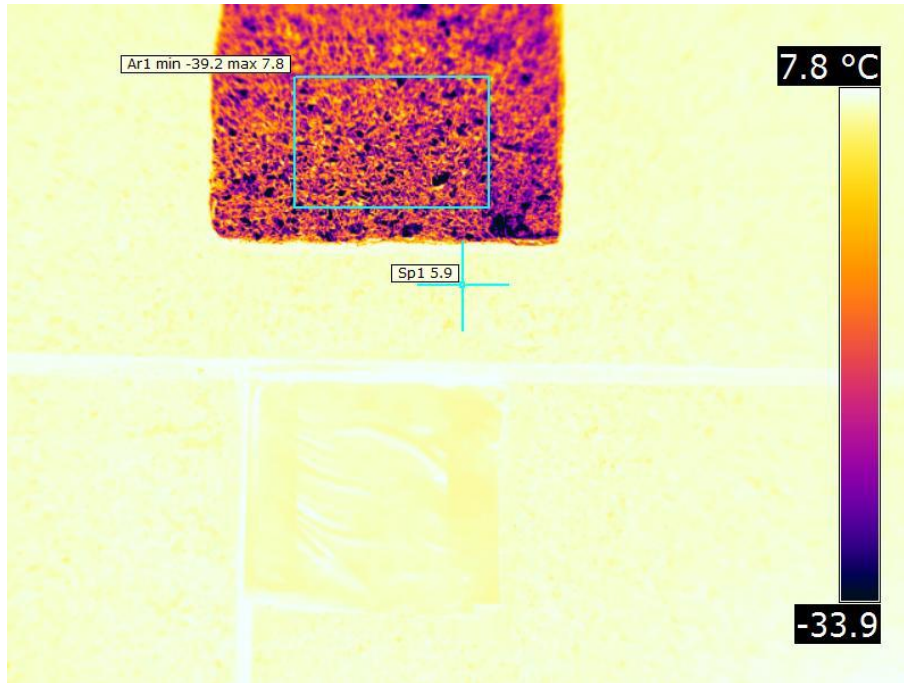
**Instrument:** Thermal camera FLIR B620, Psychrometer

**Filename(s):** TV11.jpeg, TV11a.jpeg





<b>Filename(s):</b>	IR-TV11.jpeg, IR-TV11a.jpeg		
<b>Dry-bulb temperature:</b>	8,5°	<b>Water vapor content:</b>	62%



Reflected temperature	Surface temperature of high emissivity tape	Surface Emissivity	<b>Surface Temperature</b>
-16,7°	6,0°	0,97	<b>5,9°</b>

**Test site: TREVISO - ITALY**

**Point: TV12**

**Location:** Piazza San Leonardo, on the safety island, in front of the fountain

**Environment/Material:** Type 4

**Notes:**

**Positioning (accuracy =  $\pm 30$  cm)**

**WGS84** lat 45.6660784° - 45° 39' 57.88" lon 12.2485291° - 12° 14' 54.70"

H<sub>ell</sub> = 58.39 m

**UTM-WGS84** N 5060630.03 E 285671.08 (zone 33N)

**UTM-ED50** N 5060822.85 E 285741.81 (zone 33N)

**Surface Temperature/Emissivity measurements**

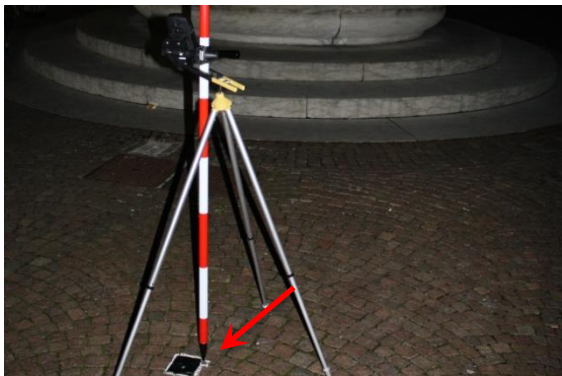
**Surface:** horizontal, pavement

**Height ref. ground:** ground level

**Hour:** 19:20 19/02/2011

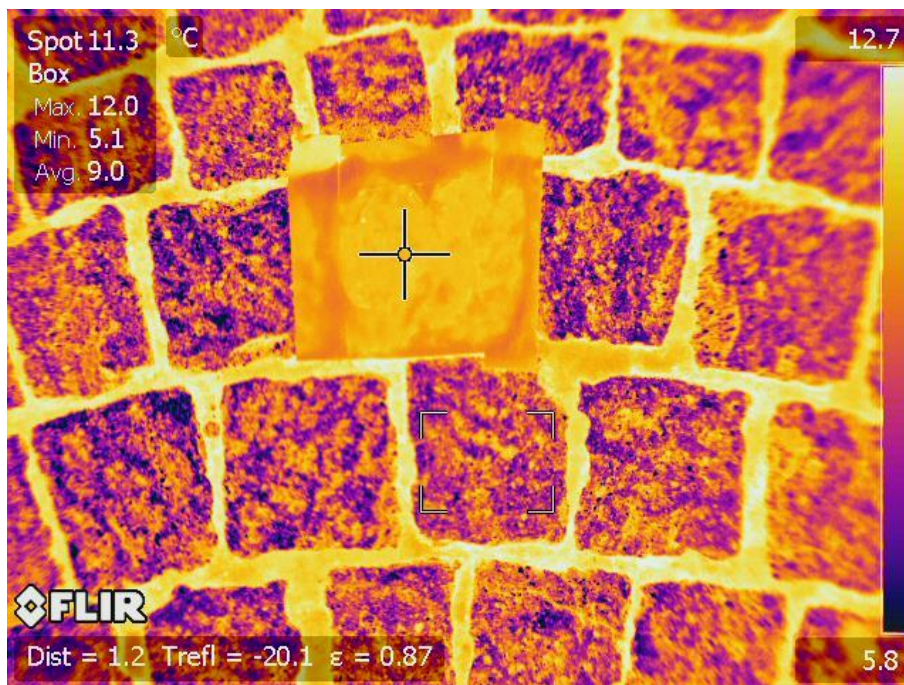
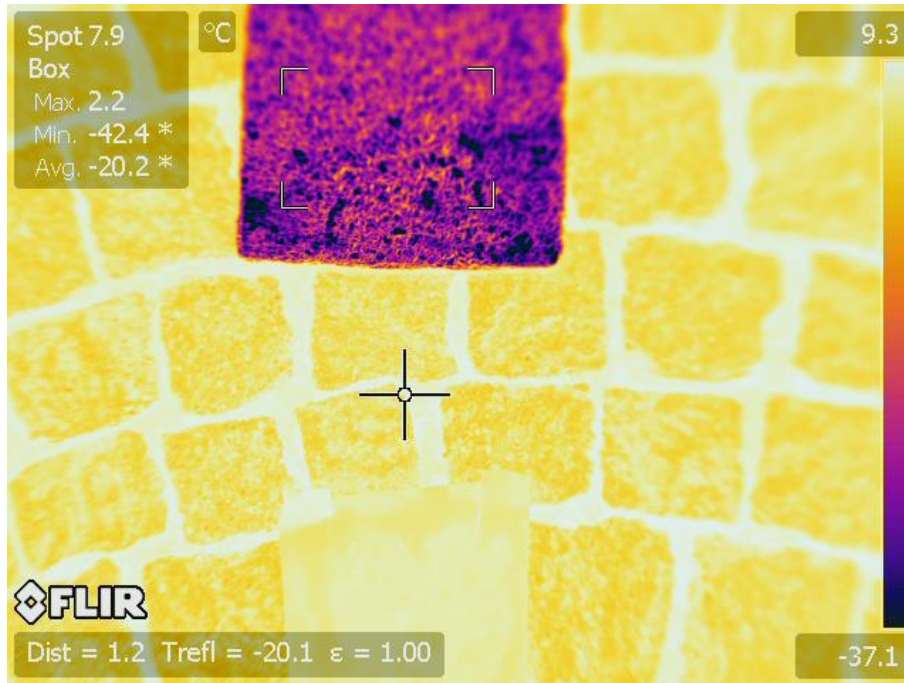
**Instrument:** Thermal camera FLIR B620, Psychrometer

**Filename(s):** TV12.jpeg, TV12a.jpeg





Filename(s):	IR-TV12.jpeg, IR-TV12a.jpeg		
Dry-bulb temperature:	9,0°	Water vapor content:	59%



Reflected temperature	Surface temperature of high emissivity tape	Surface Emissivity	Surface Temperature
-20,9°	8,9°	0,91	9,0°

**ALLEGATO 2** : Tabella di radianza spettrale di corpo nero  
( $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m$ ) al variare della Temperatura del corpo ( $^{\circ}K$ )

$\lambda$ ( $\mu m$ )	T ( $^{\circ}K$ )									
	263,15	264,15	265,15	266,15	267,15	268,15	269,15	270,15	271,15	272,15
8,0	3,916	4,019	4,123	4,230	4,338	4,449	4,561	4,676	4,792	4,910
8,1	4,004	4,108	4,214	4,321	4,431	4,542	4,656	4,771	4,888	5,007
8,2	4,090	4,194	4,301	4,409	4,520	4,632	4,746	4,862	4,980	5,100
8,3	4,172	4,277	4,384	4,494	4,605	4,718	4,833	4,949	5,068	5,189
8,4	4,250	4,356	4,464	4,574	4,686	4,800	4,915	5,032	5,152	5,273
8,5	4,325	4,432	4,541	4,651	4,763	4,877	4,993	5,111	5,231	5,353
8,6	4,397	4,504	4,613	4,724	4,837	4,951	5,068	5,186	5,306	5,428
8,7	4,465	4,573	4,682	4,794	4,907	5,022	5,138	5,257	5,377	5,499
8,8	4,530	4,638	4,748	4,859	4,973	5,088	5,205	5,323	5,444	5,566
8,9	4,591	4,700	4,810	4,921	5,035	5,150	5,267	5,386	5,506	5,628
9,0	4,649	4,758	4,868	4,980	5,093	5,208	5,325	5,444	5,565	5,687
9,1	4,704	4,812	4,923	5,034	5,148	5,263	5,380	5,499	5,619	5,741
9,2	4,755	4,864	4,974	5,085	5,199	5,314	5,431	5,549	5,669	5,791
9,3	4,803	4,911	5,021	5,133	5,246	5,361	5,478	5,596	5,716	5,837
9,4	4,848	4,956	5,066	5,177	5,290	5,405	5,521	5,639	5,758	5,880
9,5	4,889	4,997	5,107	5,218	5,331	5,445	5,561	5,678	5,797	5,918
9,6	4,927	5,035	5,144	5,255	5,367	5,481	5,597	5,714	5,832	5,953
9,7	4,962	5,070	5,179	5,289	5,401	5,515	5,629	5,746	5,864	5,984
9,8	4,994	5,102	5,210	5,320	5,431	5,544	5,659	5,775	5,892	6,011
9,9	5,024	5,130	5,238	5,348	5,459	5,571	5,685	5,800	5,917	6,035
10,0	5,050	5,156	5,263	5,372	5,483	5,594	5,707	5,822	5,938	6,056
10,1	5,073	5,179	5,286	5,394	5,504	5,615	5,727	5,841	5,956	6,073
10,2	5,094	5,199	5,305	5,413	5,522	5,632	5,744	5,857	5,971	6,087
10,3	5,112	5,216	5,322	5,429	5,537	5,646	5,757	5,870	5,983	6,098
10,4	5,127	5,231	5,336	5,442	5,549	5,658	5,768	5,880	5,993	6,107
10,5	5,140	5,243	5,347	5,452	5,559	5,667	5,776	5,887	5,999	6,112
10,6	5,150	5,252	5,356	5,460	5,566	5,673	5,782	5,891	6,002	6,115
10,7	5,158	5,259	5,362	5,466	5,571	5,677	5,785	5,893	6,003	6,114
10,8	5,164	5,264	5,366	5,469	5,573	5,678	5,785	5,893	6,002	6,112
10,9	5,167	5,267	5,368	5,470	5,573	5,677	5,783	5,890	5,998	6,107
11,0	5,168	5,267	5,367	5,468	5,571	5,674	5,779	5,885	5,991	6,099
11,1	5,168	5,266	5,365	5,465	5,566	5,669	5,772	5,877	5,983	6,090
11,2	5,165	5,262	5,360	5,459	5,560	5,661	5,764	5,867	5,972	6,078
11,3	5,160	5,256	5,354	5,452	5,551	5,652	5,753	5,856	5,959	6,064
11,4	5,154	5,249	5,345	5,442	5,541	5,640	5,741	5,842	5,945	6,048
11,5	5,145	5,240	5,335	5,431	5,529	5,627	5,726	5,827	5,928	6,030
11,6	5,135	5,229	5,323	5,418	5,515	5,612	5,710	5,809	5,910	6,011
11,7	5,124	5,216	5,309	5,404	5,499	5,595	5,692	5,790	5,890	5,990
11,8	5,111	5,202	5,294	5,388	5,482	5,577	5,673	5,770	5,868	5,967
11,9	5,096	5,186	5,278	5,370	5,463	5,557	5,652	5,748	5,845	5,942
12,0	5,080	5,169	5,260	5,351	5,443	5,536	5,629	5,724	5,820	5,916

$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	T ( $^{\circ}\text{K}$ )									
	263,15	264,15	265,15	266,15	267,15	268,15	269,15	270,15	271,15	272,15
12,1	5,063	5,151	5,240	5,330	5,421	5,513	5,606	5,699	5,794	5,889
12,2	5,044	5,131	5,219	5,308	5,398	5,489	5,581	5,673	5,766	5,860
12,3	5,024	5,110	5,197	5,285	5,374	5,464	5,554	5,645	5,738	5,831
12,4	5,003	5,088	5,174	5,261	5,349	5,437	5,527	5,617	5,708	5,799
12,5	4,981	5,065	5,150	5,236	5,322	5,410	5,498	5,587	5,677	5,767
12,6	4,957	5,041	5,125	5,209	5,295	5,381	5,468	5,556	5,645	5,734
12,7	4,933	5,015	5,098	5,182	5,267	5,352	5,438	5,524	5,612	5,700
12,8	4,908	4,989	5,071	5,154	5,237	5,321	5,406	5,492	5,578	5,665
12,9	4,882	4,962	5,043	5,125	5,207	5,290	5,374	5,458	5,543	5,629
13,0	4,855	4,934	5,014	5,095	5,176	5,258	5,340	5,424	5,508	5,592
13,1	4,827	4,906	4,984	5,064	5,144	5,225	5,306	5,388	5,471	5,555
13,2	4,799	4,876	4,954	5,032	5,111	5,191	5,272	5,353	5,434	5,517
13,3	4,770	4,846	4,923	5,000	5,078	5,157	5,236	5,316	5,397	5,478
13,4	4,740	4,815	4,891	4,967	5,044	5,122	5,200	5,279	5,358	5,438
13,5	4,710	4,784	4,859	4,934	5,010	5,086	5,164	5,241	5,320	5,399
13,6	4,679	4,752	4,826	4,900	4,975	5,050	5,126	5,203	5,280	5,358
13,7	4,648	4,720	4,792	4,866	4,939	5,014	5,089	5,164	5,241	5,317
13,8	4,616	4,687	4,758	4,831	4,903	4,977	5,051	5,125	5,200	5,276
13,9	4,583	4,653	4,724	4,795	4,867	4,940	5,012	5,086	5,160	5,234
14,0	4,550	4,620	4,689	4,760	4,830	4,902	4,974	5,046	5,119	5,192
14,1	4,517	4,586	4,654	4,724	4,793	4,864	4,935	5,006	5,078	5,150
14,2	4,484	4,551	4,619	4,687	4,756	4,825	4,895	4,966	5,036	5,108
14,3	4,450	4,516	4,583	4,651	4,718	4,787	4,856	4,925	4,995	5,065
14,4	4,416	4,481	4,547	4,614	4,680	4,748	4,816	4,884	4,953	5,022
14,5	4,382	4,446	4,511	4,576	4,642	4,709	4,776	4,843	4,911	4,979
14,6	4,347	4,411	4,475	4,539	4,604	4,670	4,735	4,802	4,869	4,936
14,7	4,312	4,375	4,438	4,502	4,566	4,630	4,695	4,760	4,826	4,893
14,8	4,277	4,339	4,401	4,464	4,527	4,591	4,655	4,719	4,784	4,849
14,9	4,242	4,303	4,364	4,426	4,488	4,551	4,614	4,678	4,741	4,806
15,0	4,207	4,267	4,327	4,388	4,450	4,511	4,573	4,636	4,699	4,762
15,1	4,172	4,231	4,290	4,350	4,411	4,472	4,533	4,594	4,656	4,719
15,2	4,136	4,195	4,253	4,312	4,372	4,432	4,492	4,553	4,614	4,675
15,3	4,101	4,158	4,216	4,274	4,333	4,392	4,452	4,511	4,571	4,632
15,4	4,065	4,122	4,179	4,236	4,294	4,352	4,411	4,470	4,529	4,589
15,5	4,030	4,086	4,142	4,198	4,255	4,313	4,370	4,428	4,487	4,545
15,6	3,994	4,049	4,105	4,160	4,217	4,273	4,330	4,387	4,444	4,502
15,7	3,959	4,013	4,068	4,123	4,178	4,233	4,289	4,346	4,402	4,459
15,8	3,923	3,977	4,031	4,085	4,139	4,194	4,249	4,305	4,360	4,416
15,9	3,888	3,941	3,994	4,047	4,101	4,155	4,209	4,263	4,318	4,374
16,0	3,853	3,904	3,957	4,009	4,062	4,115	4,169	4,223	4,277	4,331
	<b>37,549</b>	<b>38,239</b>	<b>38,937</b>	<b>39,643</b>	<b>40,356</b>	<b>41,078</b>	<b>41,807</b>	<b>42,545</b>	<b>43,290</b>	<b>44,044</b>

$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	T ( $^{\circ}\text{K}$ )									
	273,15	274,15	275,15	276,15	277,15	278,15	279,15	280,15	281,15	282,15
8,0	5,031	5,153	5,278	5,404	5,533	5,664	5,797	5,932	6,069	6,208
8,1	5,129	5,252	5,377	5,505	5,634	5,766	5,899	6,035	6,173	6,313
8,2	5,222	5,346	5,472	5,600	5,730	5,863	5,997	6,133	6,272	6,412
8,3	5,311	5,436	5,563	5,691	5,822	5,954	6,089	6,226	6,365	6,506
8,4	5,396	5,521	5,648	5,777	5,908	6,041	6,176	6,313	6,452	6,593
8,5	5,476	5,602	5,729	5,858	5,990	6,123	6,258	6,395	6,535	6,676
8,6	5,552	5,677	5,805	5,935	6,066	6,200	6,335	6,472	6,612	6,753
8,7	5,623	5,749	5,877	6,006	6,138	6,271	6,407	6,544	6,683	6,824
8,8	5,690	5,816	5,944	6,073	6,205	6,338	6,473	6,611	6,750	6,891
8,9	5,752	5,878	6,006	6,136	6,267	6,400	6,535	6,672	6,811	6,952
9,0	5,811	5,936	6,064	6,193	6,324	6,457	6,592	6,729	6,867	7,007
9,1	5,865	5,990	6,118	6,247	6,377	6,510	6,644	6,781	6,919	7,058
9,2	5,915	6,040	6,167	6,296	6,426	6,558	6,692	6,828	6,965	7,104
9,3	5,960	6,085	6,212	6,340	6,470	6,602	6,735	6,870	7,007	7,146
9,4	6,002	6,127	6,253	6,380	6,510	6,641	6,774	6,908	7,044	7,182
9,5	6,040	6,164	6,290	6,417	6,546	6,676	6,808	6,942	7,077	7,214
9,6	6,074	6,198	6,323	6,449	6,577	6,707	6,838	6,971	7,106	7,242
9,7	6,105	6,227	6,352	6,477	6,605	6,734	6,864	6,996	7,130	7,265
9,8	6,132	6,253	6,377	6,502	6,629	6,757	6,886	7,018	7,150	7,285
9,9	6,155	6,276	6,399	6,523	6,649	6,776	6,905	7,035	7,167	7,300
10,0	6,175	6,295	6,417	6,540	6,665	6,791	6,919	7,048	7,179	7,311
10,1	6,191	6,311	6,432	6,554	6,678	6,803	6,930	7,058	7,188	7,319
10,2	6,205	6,323	6,443	6,565	6,688	6,812	6,938	7,065	7,193	7,323
10,3	6,215	6,333	6,452	6,572	6,694	6,817	6,942	7,068	7,195	7,324
10,4	6,222	6,339	6,457	6,576	6,697	6,819	6,943	7,068	7,194	7,321
10,5	6,226	6,342	6,459	6,578	6,697	6,818	6,941	7,064	7,189	7,315
10,6	6,228	6,343	6,459	6,576	6,695	6,814	6,935	7,058	7,182	7,307
10,7	6,227	6,341	6,455	6,572	6,689	6,808	6,928	7,049	7,171	7,295
10,8	6,223	6,336	6,450	6,565	6,681	6,798	6,917	7,037	7,158	7,280
10,9	6,217	6,329	6,441	6,555	6,670	6,786	6,904	7,022	7,142	7,263
11,0	6,209	6,319	6,430	6,543	6,657	6,772	6,888	7,005	7,124	7,243
11,1	6,198	6,307	6,417	6,529	6,641	6,755	6,870	6,986	7,103	7,221
11,2	6,185	6,293	6,402	6,512	6,623	6,736	6,849	6,964	7,080	7,197
11,3	6,170	6,277	6,385	6,493	6,604	6,715	6,827	6,940	7,054	7,170
11,4	6,153	6,258	6,365	6,473	6,582	6,691	6,802	6,914	7,027	7,141
11,5	6,134	6,238	6,344	6,450	6,558	6,666	6,776	6,886	6,998	7,110
11,6	6,113	6,216	6,320	6,426	6,532	6,639	6,747	6,856	6,967	7,078
11,7	6,091	6,193	6,296	6,399	6,504	6,610	6,717	6,825	6,934	7,043
11,8	6,066	6,167	6,269	6,372	6,475	6,580	6,685	6,792	6,899	7,007
11,9	6,041	6,140	6,241	6,342	6,444	6,548	6,652	6,757	6,863	6,970
12,0	6,014	6,112	6,211	6,311	6,412	6,514	6,617	6,721	6,825	6,931
12,1	5,985	6,082	6,180	6,279	6,379	6,479	6,581	6,683	6,786	6,890
12,2	5,955	6,051	6,148	6,245	6,344	6,443	6,543	6,644	6,746	6,848
12,3	5,924	6,019	6,114	6,211	6,308	6,406	6,504	6,604	6,704	6,805



$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	T ( $^{\circ}\text{K}$ )									
	273,15	274,15	275,15	276,15	277,15	278,15	279,15	280,15	281,15	282,15
12,4	5,892	5,985	6,080	6,175	6,270	6,367	6,464	6,562	6,661	6,761
12,5	5,859	5,951	6,044	6,137	6,232	6,327	6,423	6,520	6,618	6,716
12,6	5,824	5,915	6,007	6,099	6,192	6,286	6,381	6,477	6,573	6,670
12,7	5,789	5,879	5,969	6,060	6,152	6,245	6,338	6,432	6,527	6,623
12,8	5,753	5,841	5,930	6,020	6,111	6,202	6,294	6,387	6,481	6,575
12,9	5,716	5,803	5,891	5,979	6,069	6,159	6,250	6,341	6,433	6,526
13,0	5,678	5,764	5,850	5,938	6,026	6,115	6,204	6,294	6,385	6,477
13,1	5,639	5,724	5,809	5,896	5,982	6,070	6,158	6,247	6,337	6,427
13,2	5,600	5,683	5,768	5,853	5,938	6,025	6,111	6,199	6,287	6,376
13,3	5,560	5,642	5,725	5,809	5,894	5,979	6,064	6,150	6,237	6,325
13,4	5,519	5,601	5,682	5,765	5,848	5,932	6,016	6,101	6,187	6,273
13,5	5,478	5,558	5,639	5,720	5,802	5,885	5,968	6,052	6,136	6,221
13,6	5,437	5,516	5,595	5,675	5,756	5,838	5,919	6,002	6,085	6,169
13,7	5,395	5,473	5,551	5,630	5,710	5,790	5,870	5,952	6,034	6,116
13,8	5,352	5,429	5,506	5,584	5,663	5,742	5,821	5,901	5,982	6,063
13,9	5,310	5,385	5,461	5,538	5,615	5,693	5,771	5,850	5,930	6,010
14,0	5,266	5,341	5,416	5,492	5,568	5,644	5,722	5,799	5,877	5,956
14,1	5,223	5,297	5,371	5,445	5,520	5,595	5,671	5,748	5,825	5,902
14,2	5,180	5,252	5,325	5,398	5,472	5,546	5,621	5,697	5,772	5,849
14,3	5,136	5,207	5,279	5,351	5,424	5,497	5,571	5,645	5,720	5,795
14,4	5,092	5,162	5,233	5,304	5,376	5,448	5,520	5,593	5,667	5,741
14,5	5,048	5,117	5,187	5,257	5,327	5,398	5,470	5,542	5,614	5,687
14,6	5,004	5,072	5,140	5,209	5,279	5,349	5,419	5,490	5,561	5,633
14,7	4,959	5,026	5,094	5,162	5,230	5,299	5,369	5,438	5,508	5,579
14,8	4,915	4,981	5,048	5,115	5,182	5,250	5,318	5,387	5,456	5,525
14,9	4,870	4,936	5,001	5,067	5,133	5,200	5,267	5,335	5,403	5,471
15,0	4,826	4,890	4,955	5,020	5,085	5,151	5,217	5,284	5,350	5,418
15,1	4,782	4,845	4,908	4,972	5,037	5,101	5,167	5,232	5,298	5,364
15,2	4,737	4,799	4,862	4,925	4,988	5,052	5,116	5,181	5,246	5,311
15,3	4,693	4,754	4,816	4,878	4,940	5,003	5,066	5,130	5,194	5,258
15,4	4,649	4,709	4,770	4,831	4,892	4,954	5,016	5,079	5,142	5,205
15,5	4,605	4,664	4,724	4,784	4,844	4,905	4,966	5,028	5,090	5,152
15,6	4,561	4,619	4,678	4,737	4,797	4,857	4,917	4,977	5,038	5,100
15,7	4,517	4,574	4,632	4,691	4,749	4,808	4,868	4,927	4,987	5,047
15,8	4,473	4,530	4,587	4,644	4,702	4,760	4,818	4,877	4,936	4,995
15,9	4,429	4,485	4,541	4,598	4,655	4,712	4,769	4,827	4,885	4,944
16,0	4,386	4,441	4,496	4,552	4,608	4,664	4,721	4,778	4,835	4,892
	<b>44,806</b>	<b>45,576</b>	<b>46,353</b>	<b>47,139</b>	<b>47,933</b>	<b>48,735</b>	<b>49,546</b>	<b>50,364</b>	<b>51,191</b>	<b>52,026</b>

$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	T ( $^{\circ}\text{K}$ )										
	283,15	284,15	285,15	286,15	287,15	288,15	289,15	290,15	291,15	292,15	293,15
8,0	6,350	6,494	6,640	6,788	6,939	7,091	7,246	7,404	7,563	7,725	7,890
8,1	6,455	6,600	6,746	6,895	7,046	7,199	7,355	7,512	7,672	7,835	7,999
8,2	6,555	6,700	6,847	6,996	7,147	7,301	7,456	7,614	7,774	7,937	8,102
8,3	6,649	6,794	6,941	7,090	7,242	7,396	7,551	7,710	7,870	8,032	8,197
8,4	6,737	6,882	7,029	7,179	7,331	7,484	7,640	7,798	7,958	8,121	8,285
8,5	6,819	6,965	7,112	7,261	7,413	7,567	7,722	7,880	8,040	8,202	8,367
8,6	6,896	7,041	7,189	7,338	7,489	7,643	7,798	7,956	8,116	8,277	8,441
8,7	6,968	7,113	7,260	7,409	7,560	7,713	7,868	8,025	8,185	8,346	8,509
8,8	7,033	7,178	7,325	7,474	7,625	7,777	7,932	8,089	8,247	8,408	8,571
8,9	7,094	7,239	7,385	7,533	7,684	7,836	7,990	8,146	8,304	8,464	8,626
9,0	7,150	7,294	7,439	7,587	7,737	7,888	8,042	8,197	8,354	8,514	8,675
9,1	7,200	7,343	7,489	7,636	7,785	7,936	8,088	8,243	8,399	8,557	8,718
9,2	7,245	7,388	7,533	7,679	7,827	7,977	8,129	8,283	8,438	8,596	8,755
9,3	7,286	7,428	7,572	7,717	7,865	8,014	8,165	8,317	8,472	8,628	8,786
9,4	7,322	7,463	7,606	7,751	7,897	8,045	8,195	8,347	8,500	8,655	8,812
9,5	7,353	7,493	7,635	7,779	7,925	8,072	8,221	8,371	8,523	8,677	8,833
9,6	7,380	7,519	7,660	7,803	7,947	8,094	8,241	8,391	8,542	8,694	8,849
9,7	7,402	7,541	7,681	7,822	7,966	8,111	8,257	8,405	8,555	8,707	8,860
9,8	7,420	7,558	7,697	7,837	7,980	8,123	8,269	8,416	8,564	8,714	8,866
9,9	7,435	7,571	7,709	7,848	7,989	8,132	8,276	8,421	8,568	8,717	8,867
10,0	7,445	7,580	7,717	7,855	7,995	8,136	8,279	8,423	8,569	8,716	8,864
10,1	7,452	7,586	7,721	7,858	7,996	8,136	8,277	8,420	8,565	8,710	8,858
10,2	7,454	7,587	7,721	7,857	7,994	8,133	8,272	8,414	8,557	8,701	8,847
10,3	7,454	7,585	7,718	7,853	7,988	8,125	8,264	8,404	8,545	8,688	8,832
10,4	7,450	7,580	7,712	7,845	7,979	8,115	8,252	8,390	8,530	8,671	8,813
10,5	7,443	7,572	7,702	7,834	7,966	8,101	8,236	8,373	8,511	8,651	8,791
10,6	7,433	7,560	7,689	7,819	7,951	8,083	8,217	8,353	8,489	8,627	8,766
10,7	7,420	7,546	7,673	7,802	7,932	8,063	8,195	8,329	8,464	8,600	8,738
10,8	7,404	7,528	7,654	7,782	7,910	8,040	8,171	8,303	8,436	8,571	8,706
10,9	7,385	7,508	7,633	7,759	7,886	8,014	8,143	8,274	8,405	8,538	8,672
11,0	7,364	7,486	7,609	7,733	7,859	7,985	8,113	8,242	8,372	8,503	8,635
11,1	7,340	7,461	7,582	7,705	7,829	7,954	8,080	8,207	8,336	8,465	8,596
11,2	7,314	7,433	7,554	7,675	7,797	7,921	8,045	8,171	8,297	8,425	8,554
11,3	7,286	7,404	7,522	7,642	7,763	7,885	8,008	8,132	8,257	8,383	8,510
11,4	7,256	7,372	7,489	7,607	7,727	7,847	7,968	8,091	8,214	8,338	8,464
11,5	7,224	7,339	7,454	7,571	7,688	7,807	7,927	8,048	8,169	8,292	8,416
11,6	7,190	7,303	7,417	7,532	7,648	7,765	7,883	8,003	8,123	8,244	8,366
11,7	7,154	7,266	7,378	7,492	7,606	7,722	7,838	7,956	8,074	8,194	8,314
11,8	7,117	7,227	7,338	7,450	7,563	7,677	7,792	7,907	8,024	8,142	8,260
11,9	7,077	7,186	7,296	7,406	7,518	7,630	7,743	7,858	7,973	8,089	8,205
12,0	7,037	7,144	7,252	7,361	7,471	7,582	7,694	7,806	7,920	8,034	8,149
12,1	6,995	7,101	7,207	7,315	7,423	7,532	7,642	7,753	7,865	7,978	8,091
12,2	6,952	7,056	7,161	7,267	7,374	7,482	7,590	7,699	7,810	7,921	8,032
12,3	6,907	7,010	7,114	7,218	7,324	7,430	7,537	7,644	7,753	7,862	7,972

$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	T ( $^{\circ}\text{K}$ )										
	283,15	284,15	285,15	286,15	287,15	288,15	289,15	290,15	291,15	292,15	293,15
12,4	6,862	6,963	7,065	7,168	7,272	7,377	7,482	7,588	7,695	7,803	7,911
12,5	6,815	6,915	7,016	7,117	7,220	7,323	7,426	7,531	7,636	7,742	7,849
12,6	6,768	6,866	6,965	7,065	7,166	7,268	7,370	7,473	7,577	7,681	7,786
12,7	6,719	6,816	6,914	7,013	7,112	7,212	7,313	7,414	7,516	7,619	7,723
12,8	6,670	6,765	6,862	6,959	7,057	7,155	7,254	7,354	7,455	7,556	7,658
12,9	6,620	6,714	6,809	6,905	7,001	7,098	7,196	7,294	7,393	7,493	7,593
13,0	6,569	6,662	6,755	6,850	6,945	7,040	7,136	7,233	7,331	7,429	7,528
13,1	6,518	6,609	6,701	6,794	6,887	6,982	7,076	7,172	7,268	7,365	7,462
13,2	6,466	6,556	6,646	6,738	6,830	6,923	7,016	7,110	7,204	7,300	7,395
13,3	6,413	6,502	6,591	6,681	6,772	6,863	6,955	7,048	7,141	7,234	7,329
13,4	6,360	6,448	6,536	6,624	6,713	6,803	6,894	6,985	7,076	7,169	7,262
13,5	6,307	6,393	6,480	6,567	6,655	6,743	6,832	6,922	7,012	7,103	7,194
13,6	6,253	6,338	6,423	6,509	6,596	6,683	6,770	6,859	6,947	7,037	7,127
13,7	6,199	6,282	6,366	6,451	6,536	6,622	6,708	6,795	6,883	6,970	7,059
13,8	6,145	6,227	6,310	6,393	6,477	6,561	6,646	6,732	6,818	6,904	6,991
13,9	6,090	6,171	6,253	6,335	6,417	6,500	6,584	6,668	6,752	6,838	6,923
14,0	6,035	6,115	6,195	6,276	6,357	6,439	6,521	6,604	6,687	6,771	6,855
14,1	5,980	6,059	6,138	6,217	6,297	6,378	6,459	6,540	6,622	6,705	6,788
14,2	5,925	6,003	6,080	6,159	6,237	6,317	6,396	6,476	6,557	6,638	6,720
14,3	5,870	5,946	6,023	6,100	6,177	6,255	6,334	6,413	6,492	6,572	6,652
14,4	5,815	5,890	5,965	6,041	6,118	6,194	6,271	6,349	6,427	6,506	6,585
14,5	5,760	5,834	5,908	5,983	6,058	6,133	6,209	6,285	6,362	6,440	6,517
14,6	5,705	5,778	5,851	5,924	5,998	6,072	6,147	6,222	6,298	6,374	6,450
14,7	5,650	5,721	5,793	5,866	5,938	6,011	6,085	6,159	6,233	6,308	6,383
14,8	5,595	5,665	5,736	5,807	5,879	5,951	6,023	6,096	6,169	6,243	6,316
14,9	5,540	5,609	5,679	5,749	5,819	5,890	5,961	6,033	6,105	6,177	6,250
15,0	5,486	5,554	5,622	5,691	5,760	5,830	5,900	5,970	6,041	6,112	6,184
15,1	5,431	5,498	5,565	5,633	5,701	5,770	5,839	5,908	5,978	6,048	6,118
15,2	5,377	5,443	5,509	5,576	5,643	5,710	5,778	5,846	5,915	5,984	6,053
15,3	5,322	5,387	5,453	5,518	5,584	5,651	5,717	5,784	5,852	5,920	5,988
15,4	5,268	5,332	5,397	5,461	5,526	5,592	5,657	5,723	5,789	5,856	5,923
15,5	5,215	5,278	5,341	5,404	5,468	5,533	5,597	5,662	5,727	5,793	5,859
15,6	5,161	5,223	5,285	5,348	5,411	5,474	5,538	5,602	5,666	5,730	5,795
15,7	5,108	5,169	5,230	5,292	5,354	5,416	5,478	5,541	5,604	5,668	5,732
15,8	5,055	5,115	5,175	5,236	5,297	5,358	5,420	5,481	5,544	5,606	5,669
15,9	5,002	5,062	5,121	5,180	5,240	5,301	5,361	5,422	5,483	5,545	5,606
16,0	4,950	5,008	5,067	5,125	5,184	5,244	5,303	5,363	5,423	5,484	5,544
	<b>52,869</b>	<b>53,720</b>	<b>54,580</b>	<b>55,447</b>	<b>56,324</b>	<b>57,208</b>	<b>58,100</b>	<b>59,001</b>	<b>59,910</b>	<b>60,828</b>	<b>61,754</b>

### ALLEGATO 3 : File di input .tp5 utilizzato per il calcolo della radianza ascendente e della trasmittività atmosferica

```

MM 7 2 1 -1 3 3 3 3 3 3 0 1 1 283.0
TTF 8 0.0 400.0 0 0 F T F T F 0
p1_2009
5 0 1 0 0 10.00000 0.00000 0.00000 0.00000
0.00000
12 0 0 Treviso MODIS 0 0 0 0
0.01 1010.0 281.00 274.00 0.0 0.0 AAF
0.06 950.0 273.37 269.14 0.0 0.0 AAF
0.29 920.0 272.28 267.75 0.0 0.0 AAF
0.92 850.0 269.45 264.06 0.0 0.0 AAF
1.59 780.0 265.97 261.40 0.0 0.0 AAF
2.43 700.0 261.53 256.95 0.0 0.0 AAF
3.35 620.0 256.26 252.26 0.0 0.0 AAF
4.94 500.0 246.19 241.82 0.0 0.0 AAF
6.51 400.0 234.98 231.07 0.0 0.0 AAF
8.43 300.0 222.31 215.41 0.0 0.0 AAF
9.61 250.0 217.85 208.15 0.0 0.0 AAF
11.03 200.0 217.14 201.52 0.0 0.0 AAF
0.85 0.015 175.0 0
8.00000 16.00000 0.10000 0.20000RM--STOP--MTAA
0

```

**ALLEGATO 4 : File di output .7sc con i valori di radianza  
ascendente e di trasmissività atmosferica**

```

MF 7      2      1      -1      3      3      3      3      3
3      0      1      1 283.000
5      1      1      0      0      0 10.00000  0.00000  0.00000  0.00000
0.01000
-99.000 -99.000 -99.000
-99.00000 -99.00000 -99.00000  0.840693  0.000086 ! H2O & O3 COLUMNS
[GM/CM2]
12      Treviso MODIS
0.85000  0.01500 175.00000  0.83819  0.00066  0.00000  0
0.00000
-99 -99 -99 -99
-99.00000 -99.00000 -99.00000 -99.00000 -99.00000 -99.00000 -99.00000 -
99.00000
615.0  1285.0  0.1  0.1RM--STOP--MTAA
0 0 0.000 0 0.000 0 1.000
WAVLEN(MCRN)      TRAN  PTH_THRML  THRML_SCT  SURF_EMIS  SOL_SCAT
SING_SCAT  GRND_RFLT  DRCT_RFLT  TOTAL_RAD  REF_SOL  SOL@OBS  DEPTH DIR_EM
TOA_SUN BBODY_T[K]
8.000000 0.7193260 1.3406E-04  4.5620E-04
0.0000E+00  5.9025E-04  0.773 1.0000
279.956
8.100000 0.8241625 8.6362E-05  5.3027E-04
0.0000E+00  6.1664E-04  0.356 1.0000
281.123
8.200000 0.8476608 7.6321E-05  5.5365E-04
0.0000E+00  6.2997E-04  0.290 1.0000
281.372
8.300000 0.8723919 6.5044E-05  5.7808E-04
0.0000E+00  6.4313E-04  0.237 1.0000
281.645
8.400000 0.8860192 5.9418E-05  5.9470E-04
0.0000E+00  6.5411E-04  0.210 1.0000
281.801
8.500000 0.8873451 5.9765E-05  6.0296E-04
0.0000E+00  6.6272E-04  0.203 1.0000
281.828
8.600000 0.9034126 5.2192E-05  6.2090E-04
0.0000E+00  6.7309E-04  0.145 1.0000
282.016
8.700000 0.9112144 4.8883E-05  6.3265E-04
0.0000E+00  6.8154E-04  0.115 1.0000
282.107
8.800000 0.9114769 4.9292E-05  6.3887E-04
0.0000E+00  6.8817E-04  0.122 1.0000
282.107
8.900000 0.9199911 4.5130E-05  6.5043E-04
0.0000E+00  6.9556E-04  0.103 1.0000
282.199
9.000000 0.9242174 4.3284E-05  6.5853E-04
0.0000E+00  7.0181E-04  0.088 1.0000
282.245

```

9.100000	0.9285209	4.1194E-05	6.6632E-04
0.0000E+00		7.0752E-04	0.080 1.0000
282.289			
9.200000	0.9339508	3.8447E-05	6.7444E-04
0.0000E+00		7.1289E-04	0.071 1.0000
282.344			
9.300000	0.9295051	4.1347E-05	6.7499E-04
0.0000E+00		7.1633E-04	0.077 1.0000
282.296			
9.400000	0.9228427	4.5533E-05	6.7348E-04
0.0000E+00		7.1902E-04	0.084 1.0000
282.227			
9.500000	0.9248920	4.4625E-05	6.7791E-04
0.0000E+00		7.2253E-04	0.080 1.0000
282.249			
9.600000	0.9318005	4.0798E-05	6.8548E-04
0.0000E+00		7.2627E-04	0.071 1.0000
282.321			
9.700000	0.9352810	3.8929E-05	6.9015E-04
0.0000E+00		7.2907E-04	0.067 1.0000
282.355			
9.800000	0.9377854	3.7573E-05	6.9373E-04
0.0000E+00		7.3130E-04	0.065 1.0000
282.378			
9.900000	0.9438124	3.4049E-05	6.9955E-04
0.0000E+00		7.3360E-04	0.058 1.0000
282.437			
10.000000	0.9514874	2.9494E-05	7.0624E-04
0.0000E+00		7.3573E-04	0.050 1.0000
282.514			
10.100000	0.9539569	2.8064E-05	7.0872E-04
0.0000E+00		7.3678E-04	0.047 1.0000
282.537			
10.200000	0.9497510	3.0665E-05	7.0589E-04
0.0000E+00		7.3656E-04	0.052 1.0000
282.492			
10.300000	0.9476843	3.1956E-05	7.0433E-04
0.0000E+00		7.3628E-04	0.054 1.0000
282.468			
10.400000	0.9482361	3.1643E-05	7.0439E-04
0.0000E+00		7.3604E-04	0.053 1.0000
282.472			
10.500000	0.9463129	3.2824E-05	7.0232E-04
0.0000E+00		7.3514E-04	0.056 1.0000
282.450			
10.600000	0.9473603	3.2183E-05	7.0215E-04
0.0000E+00		7.3433E-04	0.055 1.0000
282.459			
10.700000	0.9494830	3.0876E-05	7.0251E-04
0.0000E+00		7.3338E-04	0.052 1.0000
282.480			
10.800000	0.9479321	3.1795E-05	6.9988E-04
0.0000E+00		7.3167E-04	0.054 1.0000
282.462			
10.900000	0.9453995	3.3293E-05	6.9627E-04
0.0000E+00		7.2956E-04	0.057 1.0000
282.434			

11.000000	0.9452436	3.3331E-05	6.9417E-04
0.0000E+00		7.2750E-04	0.058 1.0000
282.430			
11.100000	0.9488897	3.1056E-05	6.9464E-04
0.0000E+00		7.2569E-04	0.053 1.0000
282.467			
11.200000	0.9465701	3.2384E-05	6.9053E-04
0.0000E+00		7.2291E-04	0.056 1.0000
282.443			
11.300000	0.9407710	3.5810E-05	6.8367E-04
0.0000E+00		7.1948E-04	0.062 1.0000
282.380			
11.400000	0.9408415	3.5668E-05	6.8089E-04
0.0000E+00		7.1656E-04	0.062 1.0000
282.379			
11.500000	0.9430195	3.4247E-05	6.7946E-04
0.0000E+00		7.1370E-04	0.060 1.0000
282.400			
11.600000	0.9345723	3.9148E-05	6.7026E-04
0.0000E+00		7.0941E-04	0.071 1.0000
282.310			
11.700000	0.9201736	4.7581E-05	6.5664E-04
0.0000E+00		7.0423E-04	0.090 1.0000
282.154			
11.800000	0.9228640	4.5847E-05	6.5506E-04
0.0000E+00		7.0091E-04	0.086 1.0000
282.180			
11.900000	0.9350052	3.8489E-05	6.6007E-04
0.0000E+00		6.9856E-04	0.070 1.0000
282.311			
12.000000	0.9387504	3.6099E-05	6.5896E-04
0.0000E+00		6.9506E-04	0.064 1.0000
282.352			
12.100000	0.9368209	3.7060E-05	6.5371E-04
0.0000E+00		6.9077E-04	0.066 1.0000
282.331			
12.200000	0.9319270	3.9721E-05	6.4630E-04
0.0000E+00		6.8602E-04	0.072 1.0000
282.278			
12.300000	0.9179983	4.7563E-05	6.3262E-04
0.0000E+00		6.8019E-04	0.091 1.0000
282.129			
12.400000	0.8820065	6.7871E-05	6.0393E-04
0.0000E+00		6.7180E-04	0.158 1.0000
281.731			
12.500000	0.8376665	9.2767E-05	5.6965E-04
0.0000E+00		6.6241E-04	0.249 1.0000
281.229			
12.600000	0.8397196	9.1243E-05	5.6683E-04
0.0000E+00		6.5807E-04	0.243 1.0000
281.243			
12.700000	0.8722718	7.2329E-05	5.8466E-04
0.0000E+00		6.5699E-04	0.180 1.0000
281.610			
12.800000	0.8756421	6.9955E-05	5.8273E-04
0.0000E+00		6.5268E-04	0.167 1.0000
281.653			

12.900000	0.8702521	7.2636E-05	5.7472E-04
0.0000E+00		6.4735E-04	0.165 1.0000
281.596			
13.000000	0.8817188	6.5863E-05	5.7783E-04
0.0000E+00		6.4369E-04	0.137 1.0000
281.727			
13.100000	0.8679317	7.2851E-05	5.6457E-04
0.0000E+00		6.3742E-04	0.156 1.0000
281.581			
13.200000	0.7931885	1.1296E-04	5.1206E-04
0.0000E+00		6.2502E-04	0.286 1.0000
280.743			
13.300000	0.6864625	1.6975E-04	4.3963E-04
0.0000E+00		6.0938E-04	0.524 1.0000
279.505			
13.400000	0.5647081	2.3334E-04	3.5881E-04
0.0000E+00		5.9215E-04	0.906 1.0000
278.037			
13.500000	0.4758045	2.7877E-04	2.9957E-04
0.0000E+00		5.7834E-04	1.243 1.0000
276.929			
13.600000	0.4567727	2.8685E-04	2.8498E-04
0.0000E+00		5.7183E-04	1.320 1.0000
276.693			
13.700000	0.4634234	2.8125E-04	2.8665E-04
0.0000E+00		5.6790E-04	1.535 1.0000
276.778			
13.800000	0.4144980	3.0332E-04	2.5450E-04
0.0000E+00		5.5782E-04	3.389 1.0000
276.084			
13.900000	0.3032062	3.5714E-04	1.8465E-04
0.0000E+00		5.4179E-04	4.965 1.0000
274.591			
14.000000	0.2278709	3.9300E-04	1.3742E-04
0.0000E+00		5.3042E-04	3.866 1.0000
273.668			
14.100000	0.1486728	4.2891E-04	8.9167E-05
0.0000E+00		5.1808E-04	4.070 1.0000
272.580			
14.200000	0.0544772	4.7057E-04	3.2448E-05
0.0000E+00		5.0302E-04	7.861 1.0000
271.073			
14.300000	0.0135122	4.8511E-04	7.9798E-06
0.0000E+00		4.9309E-04	14.539 1.0000
270.247			
14.400000	0.0027907	4.8488E-04	1.6355E-06
0.0000E+00		4.8651E-04	23.634 1.0000
269.884			
14.500000	0.0003304	4.8108E-04	1.9210E-07
0.0000E+00		4.8128E-04	32.502 1.0000
269.712			
14.600000	0.0000256	4.7669E-04	1.4754E-08
0.0000E+00		4.7670E-04	39.370 1.0000
269.637			
14.700000	0.0000005	4.7241E-04	2.6374E-10
0.0000E+00		4.7242E-04	43.851 1.0000
269.605			



14.800000	0.0000001	4.6821E-04	6.5377E-11
0.0000E+00		4.6821E-04	49.223 1.0000
269.586			
14.900000	0.0000001	4.6396E-04	4.3136E-11
0.0000E+00		4.6396E-04	58.069 1.0000
269.563			
15.000000	0.0000003	4.5991E-04	1.8957E-10
0.0000E+00		4.5991E-04	56.597 1.0000
269.570			
15.100000	0.0000008	4.5604E-04	4.4718E-10
0.0000E+00		4.5604E-04	43.754 1.0000
269.608			
15.200000	0.0000011	4.5205E-04	5.9188E-10
0.0000E+00		4.5205E-04	38.540 1.0000
269.626			
15.300000	0.0000072	4.4795E-04	3.7710E-09
0.0000E+00		4.4796E-04	39.616 1.0000
269.629			
15.400000	0.0001408	4.4403E-04	7.3080E-08
0.0000E+00		4.4410E-04	36.337 1.0000
269.670			
15.500000	0.0008177	4.4023E-04	4.2173E-07
0.0000E+00		4.4065E-04	27.898 1.0000
269.783			
15.600000	0.0029851	4.3595E-04	1.5260E-06
0.0000E+00		4.3748E-04	19.242 1.0000
269.945			
15.700000	0.0100156	4.2971E-04	5.0653E-06
0.0000E+00		4.3477E-04	12.928 1.0000
270.195			
15.800000	0.0319982	4.1746E-04	1.6032E-05
0.0000E+00		4.3349E-04	7.801 1.0000
270.704			
15.900000	0.0777664	3.9526E-04	3.8611E-05
0.0000E+00		4.3387E-04	4.823 1.0000
271.526			
16.000000	0.1565181	3.5906E-04	7.7001E-05
0.0000E+00		4.3606E-04	3.819 1.0000
272.699			
-9999.			

AVERAGE TRANSMITTANCE = 0.7402

## ALLEGATO 5 : File di input .tp5 utilizzato per il calcolo della radianza discendente

```

MM 3 2 1 1 3 3 3 3 3 3 0 0 1 0.0
1
TTF 8 0.0 400.0 g 0.861 a 0.307 F T F T F 0
p1_2009
5 0 1 0 0 10.00000 0.00000 0.00000 0.00000
0.00000
0.015 100.00 0.0 0
8.00000 16.00000 0.10000 0.20000RM--STOP--MTAA
3
0.015 100.00 5.0 0
3
0.015 100.00 10.0 0
3
0.015 100.00 15.0 0
3
0.015 100.00 20.0 0
3
0.015 100.00 25.0 0
3
0.015 100.00 30.0 0
3
0.015 100.00 35.0 0
3
0.015 100.00 40.0 0
3
0.015 100.00 45.0 0
3
0.015 100.00 50.0 0
3
0.015 100.00 55.0 0
3
0.015 100.00 60.0 0
3
0.015 100.00 65.0 0
3
0.015 100.00 70.0 0
3
0.015 100.00 75.0 0
3
0.015 100.00 80.0 0
3
0.015 100.00 85.0 0
3
0.015 100.00 90.0 0
0

```