

# Università di Pisa



Facoltà di ingegneria

Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria  
delle Telecomunicazioni

TESI DI LAUREA SPECIALISTICA

*Stima di temperatura ed emissività in dati telerilevati  
nel medio infrarosso*

Relatori:

Prof. Ing. Giovanni Corsini

Prof. Ing. Marco Diani

Ing. Nicola Acito

Ing. Stefania Matteoli

Candidato:

Claudio Starita

ANNO ACCADEMICO 2010-2011

# Indice

<b>Indice</b>	<b>ii</b>
<b>Elenco delle figure</b>	<b>iv</b>
<b>Sommario</b>	<b>v</b>
<b>1 Introduzione</b>	<b>1</b>
1.1 Elementi di Radiometria . . . . .	4
<b>2 Modello di Trasferimento della Radiazione</b>	<b>11</b>
2.1 Radiazione Misurata dal Sensore . . . . .	11
2.2 RTM: Modello di Trasferimento della Radiazione al Sensore .	13
2.3 RTM nel MIR . . . . .	16
2.4 RTM nel TIR . . . . .	19
<b>3 Separazione della Temperatura e dell'Emissività</b>	<b>22</b>
3.1 Separazione della Temperatura e dell'Emissività . . . . .	22
3.1.1 Linear Spectral Emissivity Constraint . . . . .	24
3.1.2 Empirical Orthogonal Functions . . . . .	26
3.1.3 Iterative Spectrally Smooth . . . . .	27
3.1.4 Algoritmo Stepwise Refining . . . . .	29
<b>4 Estensione dell'Algoritmo Stepwise Refining nel MIR</b>	<b>32</b>
4.1 Estendibilità del Criterio di Smoothness nel MIR . . . . .	32

4.2	Estensione dell'Algoritmo Stepwise Refining . . . . .	37
4.3	Finestre Atmosferiche . . . . .	39
4.4	Indici Prestazionali . . . . .	42
<b>5</b>	<b>Extended Stepwise Refining</b>	<b>49</b>
5.1	Prestazioni dell'Algoritmo ESR . . . . .	49
5.2	Risultati delle Simulazioni . . . . .	58
5.3	Analisi delle Condizioni di Malfunzionamento . . . . .	61
<b>6</b>	<b>Simulazione dei Dati per Sensori Reali</b>	<b>64</b>
6.1	ESR per MASI e SEBASS . . . . .	64
6.2	Inversione dell'RTM per MASI e SEBASS . . . . .	72
<b>7</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>82</b>
<b>A</b>	<b>Appendice - Modtran</b>	<b>86</b>
<b>B</b>	<b>Appendice - Librerie Spettrali</b>	<b>88</b>
B.1	ASTER . . . . .	88
B.2	MODIS . . . . .	90
<b>C</b>	<b>Appendice - I Sensori nel MIR</b>	<b>92</b>
C.1	SEBASS . . . . .	94
C.2	MASI 600 . . . . .	95
	<b>Bibliografia</b>	<b>98</b>

# Elenco delle figure

1.1	Napoli IR . . . . .	1
1.2	Ipercubo di dati . . . . .	3
1.3	Spettro elettromagnetico . . . . .	5
1.4	Intensità radiante . . . . .	6
1.5	Irradianza . . . . .	6
1.6	Radianza . . . . .	7
2.1	Modello del sistema sensore . . . . .	11
2.2	Radiazione della Terra . . . . .	14
2.3	RTM - MIR . . . . .	17
2.4	RTM - TIR . . . . .	20
3.1	Smoothness . . . . .	28
4.1	Spettri ASTER 47-54 . . . . .	35
4.2	Emissività media ASTER . . . . .	37
4.3	SR - Modulo I . . . . .	38
4.4	SR - Modulo II . . . . .	38
4.5	Numero di finestre atmosferiche . . . . .	41
5.1	Istogramma della temperatura stimata . . . . .	54
5.2	Rmse relativo di $\varepsilon_\lambda$ . . . . .	57
5.3	Spettro ASTER 101 . . . . .	59
5.4	Rmse relativo di $\varepsilon_\lambda$ con $T_s$ nota . . . . .	60

5.5	Rmse relativo di $\varepsilon_\lambda$ con controllo . . . . .	63
6.1	Smoothness con risoluzione degradata . . . . .	65
6.2	Istogramma della temperatura stimata con risoluzione degradata	69
6.3	Rmse relativo di $\varepsilon_\lambda$ con risoluzione degradata . . . . .	71
6.4	Rmse relativo di $\varepsilon_\lambda$ con $T_s$ nota e risoluzione degradata . . . .	75
6.5	Rmse relativo di $\varepsilon_\lambda$ con $T_s$ perturbata e risoluzione degradata	79
6.6	Problemi di campionamento . . . . .	81
B.1	ASTER . . . . .	89
B.2	MODIS . . . . .	91
C.1	FOV . . . . .	92
C.2	Scanner . . . . .	94
C.3	MASI 600 . . . . .	96

# Sommario

L'osservazione iperspettrale della radiazione emessa dalla Terra nell'infrarosso termico è molto importante per il monitoraggio ambientale della stessa. La zona spettrale dell'infrarosso termico, contraddistinta dalla presenza di forte emissione terrestre e quasi ininfluyente riflessione solare, è particolarmente indicata per il recupero della temperatura superficiale. Inoltre, l'estrapolazione dell'emissività spettrale del suolo, ossia della variazione dell'emissione in funzione della lunghezza d'onda, permette di distinguere le diverse tipologie di materiali presenti sulla superficie, e, potendo confrontarli con un archivio di *firme spettrali*, anche di classificarli.

Il recupero dell'emissività spettrale e della temperatura superficiale dai dati osservati è stato più volte affrontato nell'infrarosso termico, esiste infatti un'ampia serie di algoritmi che si adattano ai vari sensori esistenti e alle tipologie di dati che essi forniscono. Tale operazione, nel medio infrarosso ( $\sim 3 \div 5 \mu\text{m}$ ), risulta più difficoltosa, poiché questa zona spettrale dell'infrarosso non è favorevole come quella del termico, la radiazione emessa è meno intensa e al contempo vi è la presenza di radianza solare riflessa ad interferire.

Estendere il recupero dell'emissività spettrale anche all'infrarosso medio permette di sicuro di ottenere maggiori informazioni e quindi anche una capacità discriminatoria superiore. Ad esempio in questa zona spettrale si

riescono ad individuare le linee di assorbimento di diversi gas, quali i gas serra (vapore acqueo  $H_2O$ , biossido di carbonio  $CO_2$ , metano  $CH_4$ , ossido di azoto  $N_2O$  e ozono  $O_3$ ), di ovvia importanza per la monitorizzazione dello stato di salute dell'ambiente.

In questa tesi si è dunque considerato un algoritmo per il recupero di temperatura ed emissività, l'Extended Stepwise Refining, nato dal prolungamento del pre-esistente Stepwise Refining dall'infrarosso termico al medio. Si è innanzitutto verificata la legittimità di tale estensione, indi si è valutato il grado di accuratezza con il quale tali parametri vengono stimati dall'algoritmo. I risultati sono stati analizzati e giustificati, sottolineando le condizioni di malfunzionamento dell'ESR.

Il principio di funzionamento dell'algoritmo Extended Stepwise Refining suppone una risoluzione elevata dei dati osservati non disponibile nella realtà. Si è quindi verificato quanto le prestazioni dell'ESR peggiorassero in presenza di dati ottenibili da sensori reali. Si è anche valutato, infine, la bontà nel recupero dell'emissività spettrale supponendo di ottenere un dato di temperatura da osservazioni nell'infrarosso termico.

# Capitolo 1

## Introduzione

In questo elaborato di laurea viene indagato un algoritmo per il recupero delle informazioni di interesse radiativo, quali a temperatura superficiale e l'emissività spettrale, a partire da dati iperspettrali nel medio infrarosso.



**Figura 1.1:** Immagine infrarossi del golfo di Napoli - RapidEye

La temperatura superficiale consente di studiare e monitorare lo stato di

salute dell'ambiente nella zona osservata e, quindi, della totalità del globo terrestre.

L'emissività spettrale è una caratteristica intrinseca della superficie terrestre che dipende da come essa è composta ed è utile per studi geologici nonché per il mappaggio della superficie terrestre, e per ogni tipologia di applicazioni per cui una classificazione di qualsiasi tipo del suolo possa risultare utile. In figura (Fig. 1.1) è mostrata un'immagine ad infrarossi del golfo di Napoli.

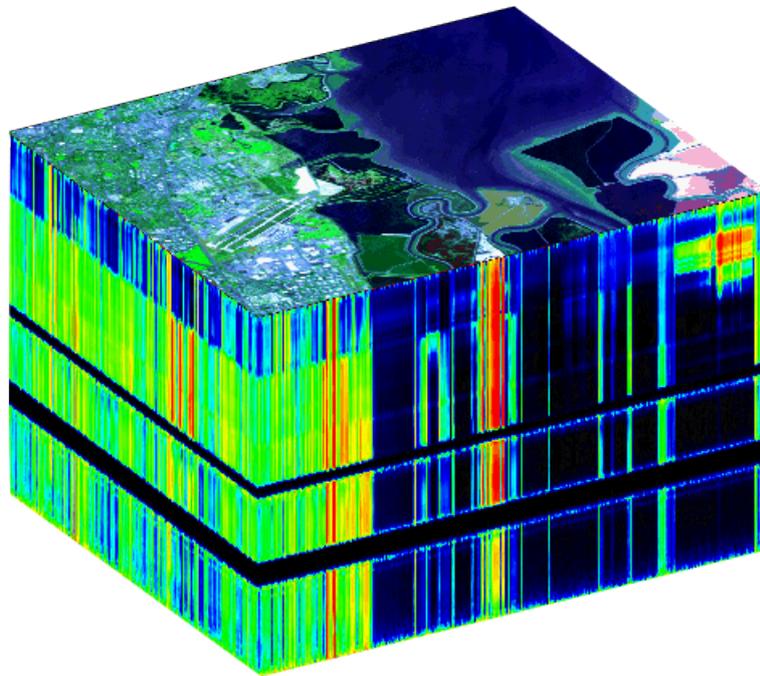
L'osservazione iperspettrale consente di fotografare l'immagine osservata in corrispondenza un numero elevato di lunghezze d'onda (Fig. 1.2). Ogni materiale è identificato da una *firma spettrale*, ossia dal modo in cui la sua emissione varia al variare della lunghezza d'onda. Il recupero dell'emissività permette dunque di suddividere per caratteristiche e classificare le diverse zone di superficie osservata.

L'analisi trattata sarà suddivisa nell'elaborato di laurea fornendo innanzitutto una descrizione dei fondamenti della fisica che concerne il problema nel primo capitolo.

Il modello di trasferimento della radiazione, discusso nel secondo capitolo, costituisce appunto la modellizzazione del particolare problema analizzato, sulla base dei fenomeni fisici che lo compongono.

Una volta fornito il modello, nel terzo capitolo si analizza il problema della separazione della temperatura e dell'emissività superficiale nell'infrarosso termico e si presentano alcune possibili risoluzioni, con una particolare attenzione al criterio di *smoothness*, e si introduce l'algoritmo Stepwise Refining.

Nel quarto capitolo si sposta il discorso presentato nel terzo capitolo dall'infrarosso termico al medio, osservando i cambiamenti che tale spostamento implica sulla proprietà di *smoothness* e in che modo debba essere modificato



**Figura 1.2:** Rappresentazione tramite cubo di un'immagine iperspettrale - AVIRIS

l'algoritmo Stepwise Refining per essere esteso al MIR. Sono inoltre introdotti gli indici prestazionali per valutarne le prestazioni.

Il quinto capitolo è dedicato all'applicazione dell'algoritmo Extended Stepwise Refining, che viene simulato per un vasto numero di spettri di emissività, e se ne discutono i risultati.

Nel sesto capitolo si simula il dato ottenibile da sensori reali e si valutano nuovamente le prestazioni dell'Extended Stepwise Refining, nonché del recupero dell'emissività supponendo di ottenere la temperatura superficiale in modo alternativo.

Infine, nel settimo capitolo, si effettua una considerazione finale sul lavoro svolto e sui risultati ottenuti.

Sono presenti delle appendici a concludere l'elaborato al fine di descrive-

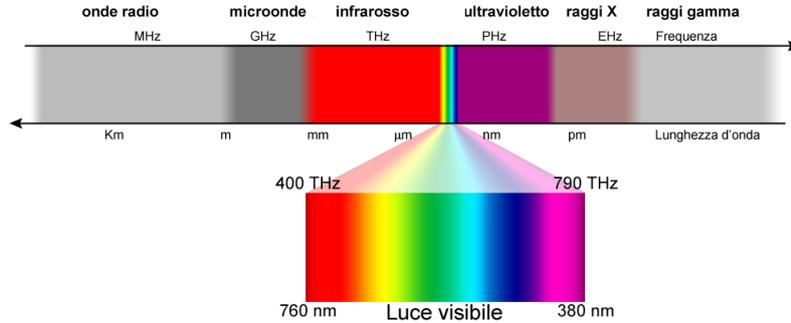
re gli strumenti tecnici utilizzati per effettuare le simulazioni effettuate nei precedenti capitoli.

## 1.1 Elementi di Radiometria

Per Telerilevamento si intende l'acquisizione di informazioni su di un'area geografica tramite uno strumento remoto. L'osservazione ovvero la misurazione della radiazione elettromagnetica permette di ricavare tali informazioni una volta note le relazioni che intercorrono tra la materia e le sue proprietà radianti. Lo sviluppo delle conoscenze di questa branca della fisica ebbe un notevole incremento nella seconda metà del XIX secolo, Maxwell unificò la teoria dell'elettromagnetismo nel 1864 [1], e solo pochi anni prima, nel 1860, Kirchhoff aveva coniato il termine "corpo nero" [2] per descrivere un corpo ideale che assorbe la totalità della radiazione che vi incide. È nel 1901 inoltrato però che Max Planck sconvolse la fisica introducendo la affascinante ipotesi dei quanti [3]. Smentendo la teoria classica, il fisico tedesco asserì che gli scambi energetici avvenissero in forma discreta e proporzionale all'oscillazione e non più in forma continua. Responsabile della radiazione è il fotone, il quanto di Planck, una particella elementare dalla duplice natura corpuscolare ed ondulatoria. Ed è proprio in virtù di questa sua duplice natura che la radiazione elettromagnetica, ossia la propagazione del campo elettromagnetico, possa essere analizzata come una perturbazione ondulatoria dello spazio, ed essere dunque classificabile in base alla frequenza (o alternatively alla lunghezza d'onda) delle oscillazioni. La rappresentazione di tale classificazione prende il nome di spettro elettromagnetico (Fig. 1.3).

Il postulato di Planck permise inoltre di risolvere il problema della radiazione del corpo nero, come si vedrà in seguito.

Prima di procedere oltre però è necessario introdurre dei concetti e delle definizioni che verranno adoperate diffusamente in questo elaborato di laurea.



**Figura 1.3:** Spettro elettromagnetico

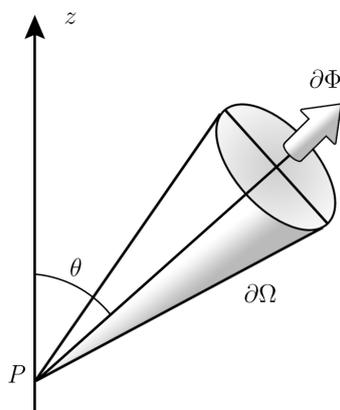
Come detto, le proprietà della materia sono osservate tramite la misurazione delle radiazioni. La scienza che si occupa di ciò è la Radiometria. I concetti di energia e potenza sono i medesimi di ogni branca della fisica, ma nella fattispecie sono associati alla radiazione, per cui si introduce una *energia radiante*  $Q$  [Joule] come la quantità di energia associata ad un'onda elettromagnetica che attraversa, emerge o incide una superficie; e parallelamente il *flusso di potenza radiante*  $\Phi$  [W] come energia radiante per unità di tempo:

$$\Phi = \frac{\partial Q}{\partial t}.$$

Al fine di utilizzare grandezze che meglio si sposino con le geometrie tipiche dei processi radiativi che intervengono in materia di telerilevamento, è frequente l'utilizzo di altre grandezze energetiche per esprimere l'entità della radiazione. Considerando la potenza radiante per unità di angolo solido, si definisce l'*intensità radiante* [W/sr] (Fig. 1.4):

$$I = \frac{\partial \Phi}{\partial \Omega}.$$

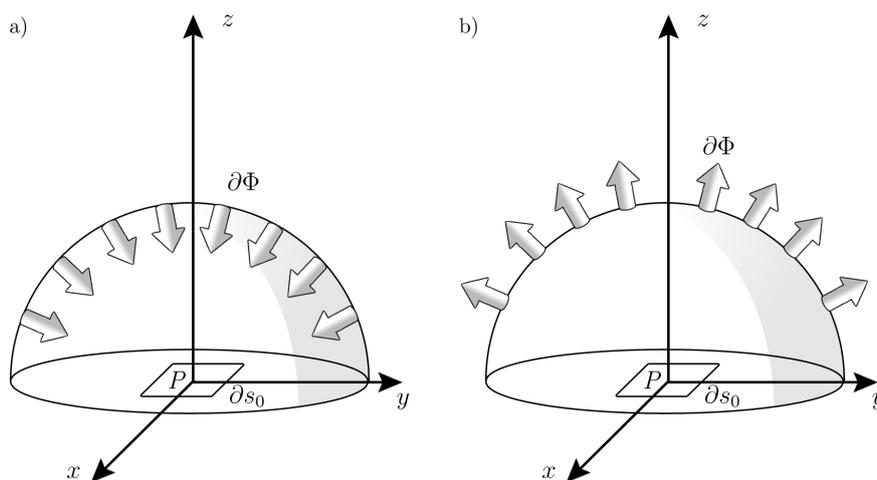
L'*irradianza* [W/m<sup>2</sup>] (Fig. 1.5) è il flusso di potenza per unità di superficie:



**Figura 1.4:** Intensità radiante

$$E = \frac{\partial\Phi}{\partial s_0}. \quad (1.1)$$

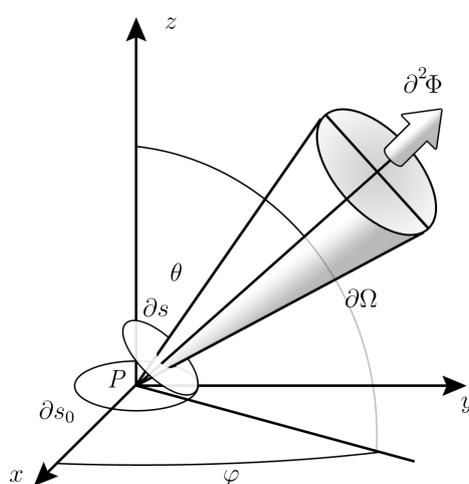
Se l'intensità radiante è utile per quantificare l'energia radiante proveniente da una sorgente puntiforme al variare della direzione di osservazione, l'irradianza rappresenta la totalità della radiazione che interagisce con la superficie in questione. In particolare se la radiazione è emessa dalla superficie, l'irradianza viene indicata con il simbolo  $M$  e prende il nome di *exitanza* (Fig. 1.5 b).



**Figura 1.5:** a) Irradianza incidente; b) irradianza uscente (*Exitanza*)

I concetti di intensità radiante e di irradianza convergono nella definizione della *radianza* [ $W/m^2sr$ ], ovvero la quantità di potenza radiante per unità di area proiettata e di angolo solido in una data direzione e da un determinato punto della superficie (Fig. 1.6)

$$L = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial s_0 \cos \theta \partial \Omega} \quad (1.2)$$



**Figura 1.6:** Radianza

Le grandezze introdotte sino ad ora fanno riferimento alla totalità dell'energia radiante, per le analisi relative al telerilevamento (e non solo) è però indispensabile particolarizzare l'entità delle radiazioni in funzione delle oscillazioni. Dal momento che sostanze diverse emettono a lunghezze d'onda diverse, è proprio tramite l'analisi spettrale che si ottengono le informazioni sulla natura della materia irradiante. È pertanto necessario riferirsi all'energia spettrale, il che comporta nelle precedenti definizioni una operazione di derivazione parziale rispetto alla lunghezza d'onda:

Energia radiante spettrale	$Q_\lambda = \frac{\partial Q}{\partial \lambda}$
Flusso di potenza radiante spettrale	$\Phi_\lambda = \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda}$
Intensità radiante spettrale	$I_\lambda = \frac{\partial I}{\partial \lambda}$
Irradianza spettrale	$E_\lambda = \frac{\partial E}{\partial \lambda}$
Radianza spettrale	$L_\lambda = \frac{\partial L}{\partial \lambda}$

Ogni corpo, al di sopra dello zero assoluto, emette radiazioni. Come potrebbe essere descritta questa capacità emissiva, in funzione di temperatura e lunghezza d'onda, in un corpo ideale capace di assorbire ogni radiazione che vi incide (i.e. corpo nero)? Questa domanda, posta da Kirchhoff nella promulgazione della sua legge [2], costituì il problema del corpo nero. Nel 1896, Wilhelm Wien propose una soluzione empirica, che fu poi dimostrata da Planck, alla quale ci si riferisce come Legge di Wien o Legge di Wien-Planck, che bene approssimava il comportamento radiante di un corpo nero per onde lunghe, ma falliva nel descriverlo per le alte frequenze. La Legge di Rayleigh-Jeans, promulgata nel 1900, ben funzionava per le onde corte ma perdeva aderenza per quelle lunghe. Il problema, come accennato, fu risolto l'anno seguente da Planck, postulando i quanti. Egli riuscì a ricavare la formula completa della radiazione di un corpo nero, espressa da quella che è universalmente conosciuta come Legge di Planck:

$$L_\lambda^{bb}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \left( e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)}; \quad (1.3)$$

dove:

$h = 6.626 \cdot 10^{-34}$	[Joule·s]	costante di Planck
$k = 1.38 \cdot 10^{-23}$	[Joule·K <sup>-1</sup> ]	costante di Boltzmann
$c = 3 \cdot 10^8$	[m·s <sup>-1</sup> ]	velocità della luce
$\lambda$	[m]	lunghezza d'onda
$T$	[K]	temperatura

A differenza di un generico corpo reale, il corpo nero irradia in maniera isotropica; la sua irradianza è dunque facilmente ricavabile, considerando le equazioni (1.1) e (1.2):

$$\partial E = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial s_0} = L \cos \theta \partial \Omega;$$

ed integrando nell'emisfero considerato:

$$E = \int_{2\pi} L \cos \theta \partial \Omega. \quad (1.4)$$

Il corpo nero irradia in maniera uniforme, ossia verifica la Legge del coseno di Lambert [4] che permette di semplificare la (1.4) e ricavare la seguente relazione tra irradianza e radianza:

$$E = L\pi. \quad (1.5)$$

Il radiatore ideale è dunque *lambertiano*, la Legge di Planck (1.3) ne mostra la variazione in funzione della lunghezza d'onda, la dipendenza dalla temperatura invece ne è indicativamente mostrata dalla Legge dello spostamento di Wien. Nel 1892 il fisico tedesco ricavò una relazione tra la lunghezza d'onda in corrispondenza della quale la radiazione del corpo nero assume valore massimo e la sua temperatura:

$$\lambda_{MAX} = \frac{b}{T}; \quad (1.6)$$

con  $b = 2897.8 \mu m K$ .

L'irradianza emessa in funzione della temperatura è espressa invece dalla Legge di Stefan-Boltzmann:

$$E^{bb} = \int_0^\infty E_\lambda^{bb} d\lambda = \sigma T^4; \quad (1.7)$$

dove  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} W K^4/m^2$ . Tale legge fu ricavata sperimentalmente da Stefan nel 1879 [5] e in seguito dimostrata da Boltzmann nel 1884 [6].

Come spesso accade in fisica, si introduce il caso ideale per poi modellarlo nelle particolari condizioni reali. Così avviene per il corpo nero. Un radiatore reale è infatti identificabile dalla sua emissività, ossia dal rapporto tra la sua radianza spettrale e quella di un corpo nero alla medesima temperatura:

$$\varepsilon_\lambda = \frac{L_\lambda(T)}{L_\lambda^{bb}(T)}. \quad (1.8)$$

L'emissività è legata alle proprietà di assorbimento di un corpo. Considerando che la radiazione che incide su un corpo può essere riflessa, trasmessa e assorbita, si definiscono dei coefficienti di riflettanza, trasmittanza ed assorbanza che esprimono la frazione di radiazione riflessa, trasmessa e assorbita. La riflettanza è legata all'emissività di un corpo, fu proprio Kirchhoff [2] a promulgare la legge secondo la quale, all'equilibrio termico, un buon emettitore è nella stessa maniera un pessimo riflettore e viceversa. Per un corpo *opaco*, ossia con trasmittanza nulla, considerando grandezze spettrali ed indicando con  $\rho$  la riflettanza, tale legge si esplicita nel seguente modo:

$$\rho_\lambda + \varepsilon_\lambda = 1. \quad (1.9)$$

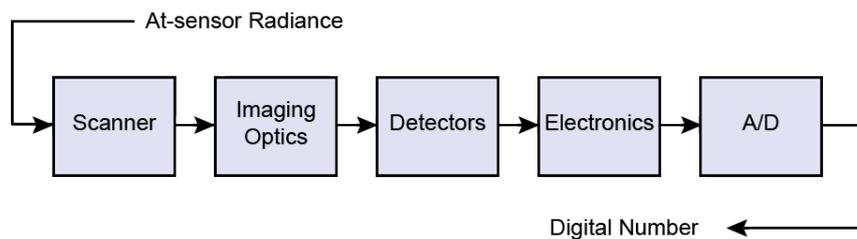
È da questa considerazione che Kirchhoff pone appunto il problema del corpo nero, chiedendosi come possa essere descritta l'emissione dell'assorbitor perfetto.

# Capitolo 2

## Modello di Trasferimento della Radiazione

### 2.1 Radiazione Misurata dal Sensore

Utilizzando il modello presentato da Schowengerdt [7], è possibile identificare i vari passaggi che deve attraversare la radiazione misurata per diventare una cifra digitale, ossia un pixel.



**Figura 2.1:** Modello del sistema sensore

La fase di scansione combina le informazioni spaziali alla radianza misurata e le converte in un segnale elettronico variabile nel tempo. Tale segnale viene quantizzato in una cifra digitale che è proporzionale alla radianza misurata e rappresenta il valore del pixel.

Il sistema costituito dal sensore è in generale assumibile come lineare ed invariante alle traslazioni, pertanto è possibile identificare una risposta impulsiva  $r(z)$  che relazioni i segnali in ingresso  $i(z)$  a quello in uscita  $o(z)$ :

$$o(z) = \int_{-\infty}^{\infty} i(\alpha)r(z - \alpha) d\alpha.$$

Poiché si considerano sensori che fotografano non un singolo pixel per volta bensì un'area, e per diverse lunghezze d'onda, il concetto di risposta impulsiva va esteso sia al dominio spaziale che a quello spettrale. In entrambi i casi essa prende il nome di risoluzione.

In primo luogo la radianza della scena osservata è filtrata attraverso un sistema ottico, il cui contributo è inglobato nella *camera equation*, che, in ipotesi semplificate, assume la seguente espressione:

$$E_{\lambda}^i(x, y) = \frac{\pi\tau_0(\lambda)}{4N^2}L_{\lambda}(x, y). \quad (2.1)$$

Si è considerato che  $E_{\lambda}^i(x, y)$  è l'irradianza al sensore,  $L_{\lambda}(x, y)$  è la radianza della scena,  $\tau_0(\lambda)$  è la trasmittanza del sistema ottico (solitamente superiore al 90% e costante sulla banda del sistema ottico) e  $N$  è il rapporto tra la lunghezza focale e l'apertura dell'ottica.

Il segnale elettronico, esprimibile in corrente o in tensione, è dunque ottenibile tramite convoluzione dell'irradianza al sensore per la risoluzione spettrale, fornita in termini di [A/W] o [V/W] a seconda della tipologia del segnale elettronico utilizzato:

$$s_b(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} R_b(\lambda)E_{\lambda}^i(x, y) d\lambda. \quad (2.2)$$

Nel dominio spaziale tanto il sensore quanto l'ottica e il rivelatore contribuiscono ad una distorsione dell'immagine, che è descritta dalla *Point Spread Function*  $PSF_{net}$ :

$$e_b(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} s_b(\alpha, \beta)PSF_{net}(x - \alpha, y - \beta) d\alpha d\beta. \quad (2.3)$$

La  $PSF_{opt}$  descrive la distribuzione sul piano immagine dell'energia radiante proveniente da una sorgente puntiforme. Essa ingloba gli effetti di distorsione che l'ottica produce, quali aberrazione e diffrazione, che vengono solitamente espressi con modello gaussiano:

$$PSF_{opt}(x, y) = \frac{1}{2\pi ab} e^{-x^2/2a^2} e^{-y^2/2b^2}.$$

Il fotorivelatore ha un'area finita, ciò introduce ulteriori distorsioni spaziali espresse nella  $PSF_{det}$ :

$$PSF_{det}(x, y) = \text{rect}\left(\frac{x}{GIFOV}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{GIFOV}\right);$$

dove il parametro  $GIFOV$  rappresenta l'area osservata dal singolo fotorivelatore (C.1).

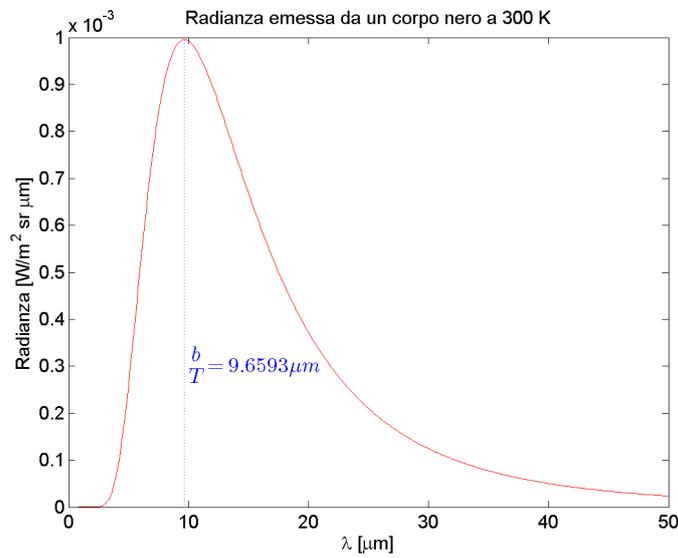
Il movimento relativo del sensore rispetto alla scena osservata introduce anch'esso una distorsione, espressa dalla  $PSF_{IM}$ , che dipende dalle tipologie di scansione utilizzate, descritte nel seguito di questo elaborato. Le tipologie di scansione influiscono anche nel modellare la distorsione elettronica  $PSF_{el}$  che tiene conto dei filtraggi passa basso che vengono effettuati sul segnale elettronico per ridurre il rumore.

## 2.2 RTM: Modello di Trasferimento della Radiazione al Sensore

Le radiazioni elettromagnetiche caratterizzate da lunghezze d'onda comprese tra circa 700 nm e 1 mm appartengono alla zona chiamata infrarosso. L'infrarosso è a sua volta diviso in sottospettri in base alla lunghezza d'onda. A seconda degli ambiti esistono diverse suddivisioni. In particolare in questo elaborato di laurea si considereranno specialmente le zone comunemente note come infrarosso medio (MIR) e termico (TIR), ossia si fa riferimento alle

porzioni di spettro comprese rispettivamente tra i 3 e i 5 e tra gli 8 e i 12  $\mu\text{m}$ .

Caratteristica del TIR è la presenza di forte emissione da parte della Terra. Se infatti in prima analisi il globo terrestre viene ipotizzato essere un corpo nero alla temperatura media di 27 °C, ossia 300 K, per la legge dello spostamento di Wien (1.6), la radiazione massima si ha in corrispondenza di circa 10  $\mu\text{m}$  (Fig. 2.2).



**Figura 2.2:** Radiazione della Terra

Poiché però la Terra non è un corpo nero, essa sarà caratterizzata da un'emissività spettrale, e dunque, per la (1.8), la radiazione emessa dal suolo è:

$$L_{\lambda}^{earth} = \varepsilon_{\lambda} L_{\lambda}^{bb}(T_s). \quad (2.4)$$

Lo scopo del telerilevamento è quindi quello di estrapolare i valori dell'emissività spettrale e della temperatura superficiale per ottenere informazioni sulla materia costituente la superficie osservata.

Il primo problema da risolvere è dunque isolare la componente di radiazione emessa all'interno della radiazione osservata dal sensore remoto. Ciò poiché il dato misurato è composto anche da contributi di radianza di altra natura. L'interferenza è additiva, per cui vi sono altre sorgenti la cui radiazione si somma a quella utile. Conoscere la natura di queste radianze e modellarne il comportamento è essenziale per poter ricondursi alla radiazione emessa e quindi estrapolare i parametri di interesse.

La prima causa di radiazione è banalmente il sole. Esso può inizialmente essere confuso, analogamente a quanto detto per la Terra, con un corpo nero, la cui temperatura si aggira intorno a circa 6000 K. Ciò comporta un massimo di radiazione intorno a  $0.5 \mu\text{m}$ , ossia la radianza solare assume valori massimi nel visibile. Il sole però dista dalla Terra mediamente 150 milioni di chilometri. Percorrere tale distanza si ripercuote sulla radiazione che, considerata all'inizio dell'atmosfera, appare attenuata. Tale attenuazione ovviamente pesa maggiormente in corrispondenza di quelle lunghezze d'onda dove già la radiazione solare è inferiore, con il risultato che nel visibile il contributo solare continua ad essere predominante rispetto alla radiazione emessa dalla Terra. Nell'infrarosso termico invece è l'emissione terrestre ad essere nettamente superiore al contributo solare. La zona spettrale relativa all'infrarosso medio è la più delicata in quanto i contributi solare e di emissione assumono valori di radianza comparabili.

La radiazione solare, attenuata, prima di essere rilevata dal sensore, incontra l'atmosfera. Gli strati di gas che avvolgono la Terra hanno diversi effetti affatto ininfluenti. La diffusione della radiazione solare fa sì che non solo una componente diretta si rifletterà verso il sensore ma anche un'ulteriore componente, per l'appunto, diffusa.

Ma il ruolo dell'atmosfera non si esaurisce nel canale con *scattering*, la presenza di gas provoca due fenomeni anche più importanti della diffusione della luce solare. Innanzitutto, essa è sorgente di radiazioni, per cui il sensore rileverà componenti di emissione atmosferica dirette ma anche riflesse.

In secondo luogo, essa sarà contraddistinta dal modo in cui la radiazione la attraversa, ossia le radiazioni che la attraversano, sia in direzione discendente che ascendente, devono essere pesate per un coefficiente di trasmittanza spettrale.

Il modello di trasferimento della radiazione si propone appunto di modellare la radianza misurata dal sensore in funzione delle varie sorgenti che influiscono su di essa. Le differenti entità dei contributi da considerare, al variare degli intervalli spettrali di lavoro, fanno sì che il modello assuma forme distinte a seconda delle zone di applicazione.

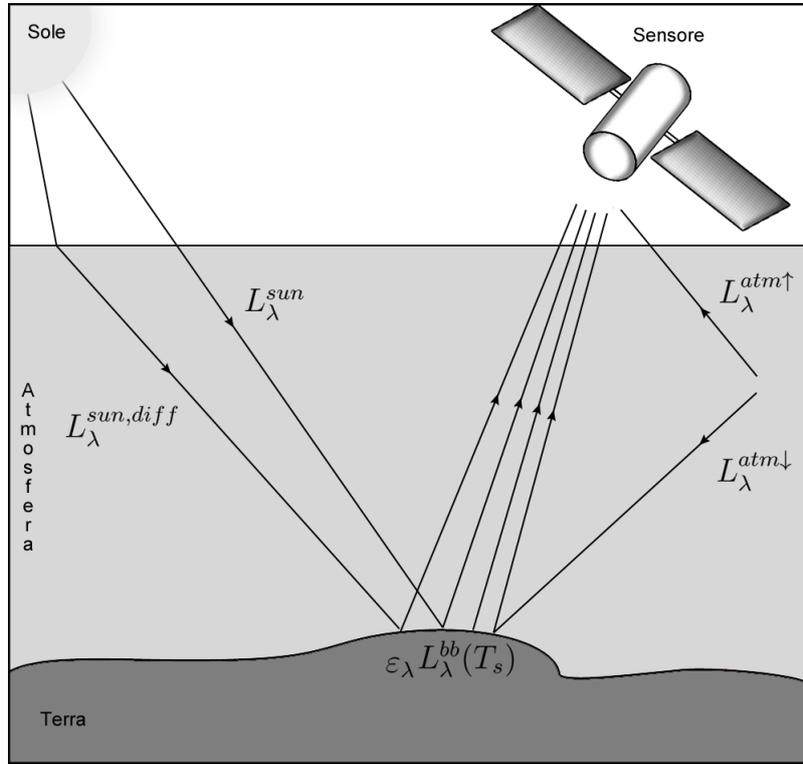
## 2.3 RTM nel MIR

Nel precedente paragrafo sono state elencate le radianze che potenzialmente concorrono nella misurazione del sensore. In particolare, nel medio infrarosso, si è accennato che le componenti di radiazione solare e di emissione terrestre, nonché di radianza atmosferica, assumono valori comparabili, e pertanto vanno considerate nel valutare il dato rilevato al sensore.

La radiazione misurata è dunque esprimibile secondo il seguente modello:

$$L_\lambda = \left( \varepsilon_\lambda L_\lambda^{bb}(T_s) + \rho_\lambda (L_\lambda^{sun} + L_\lambda^{atm\downarrow} + L_\lambda^{sun,diff}) \right) \tau_\lambda^{atm\uparrow} + L_\lambda^{atm\uparrow}; \quad (2.5)$$

Le grandezze considerate sono le seguenti nella precedente equazioni e riportate nella figura (Fig. 2.3) sono le seguenti:



**Figura 2.3:** Modello di trasferimento della radiazione

$\varepsilon_\lambda$	Emissività spettrale
$L_\lambda^{bb}(T_s)$	Radianza di un corpo nero a $T_s$ K
$\rho_\lambda$	Riflettanza spettrale
$L_\lambda^{sun}$	Radiazione solare al suolo
$L_\lambda^{atm\downarrow}$	Radiazione atmosferica al suolo
$L_\lambda^{sun,diff}$	Radiazione solare diffusa al suolo
$\tau_\lambda^{atm\uparrow}$	Trasmittanza atmosferica
$L_\lambda^{atm\uparrow}$	Radianza atmosferica diretta al sensore

La radianza atmosferica diretta al sensore  $L_\lambda^{atm\uparrow}$  è solitamente omessa in quanto l'entità di tale radiazione è considerevolmente inferiore agli altri contributi, per cui la (2.5) si semplifica in:

$$L_\lambda = \left( \varepsilon_\lambda L_\lambda^{bb}(T_s) + \rho_\lambda (L_\lambda^{sun} + L_\lambda^{atm\downarrow} + L_\lambda^{sun,diff}) \right) \tau_\lambda^{atm\uparrow}. \quad (2.6)$$

L'atmosfera è suddivisibile in più fasce a seconda della sua composizione,

al fine di descriverne il comportamento, quindi, si fa solitamente riferimento ad un modello a strati. Una sostanziosa campagna di misurazioni permette di estrapolare i parametri di interesse relativi ai vari strati, in questo modo è possibile tener conto della influenza dell'atmosfera nel trasferimento della radiazione. Il dato misurato dal sensore deve dunque subire anche un processo di correzione atmosferica per ricondursi a quello che è il contributo di radiazione al suolo. Si nota che, per determinate lunghezze d'onda, come si vedrà in seguito, l'atmosfera presenta fortissime attenuazioni, per cui ivi non sarà possibile effettuare una correzione affidabile, ovvero il dato recuperato in tali porzioni di banda è pressoché inutilizzabile.

Assumendo ininfluenza anche il contributo della radiazione solare riflessa, secondo quanto suggerito da Cheng *et al.* [8], il modello di trasferimento della radiazione RTM si semplifica ulteriormente e permette di ricavare la radianza *Ground-Leaving*:

$$L_{\lambda}^{gl} = \varepsilon_{\lambda} L_{\lambda}^{bb}(T_s) + (1 - \varepsilon_{\lambda}) L_{\lambda}^{env}. \quad (2.7)$$

Si è considerato innanzitutto che  $\rho_{\lambda} = 1 - \varepsilon_{\lambda}$  per la legge di Kirchhoff (1.9), mentre la radianza *Environmental* è definita come segue, rispettivamente in condizioni di osservazione diurne e notturne (ossia in presenza o assenza di radiazione solare):

$$L_{\lambda}^{env,day} = L_{\lambda}^{atm\downarrow} + L_{\lambda}^{sun}; \quad (2.8)$$

$$L_{\lambda}^{env,night} = L_{\lambda}^{atm\downarrow}. \quad (2.9)$$

Riassumendo quindi, la radiazione misurata dal sensore remoto nel medio infrarosso subisce un'alterazione non sempre reversibile a causa della trasparenza atmosferica. Laddove tale operazione non è irreversibile, si effettua una correzione onde estrapolare un dato che è essenzialmente dovuto al contributo di radianza *Ground-Leaving*. Tale radianza, che rappresenta la totalità della radiazione proveniente da una determinata zona del suolo, è composta sia dalla radiazione emessa dal suolo stesso che dalla radiazione di natura at-

mosferica e solare che vi incide e ne viene riflessa. L'influenza della radianza di natura solare nella radiazione misurata dal sensore implica la necessità di un distinguo tra condizioni di osservazioni diurne o notturne. L'introduzione di un termine più generico di radianza *Environmental* permette di sintetizzare le due condizioni in un unico modello di trasferimento della radiazione, ma la natura della radiazione ambientale varia, includendo o meno l'influenza solare a seconda appunto delle condizioni di osservazioni diurne o notturne.

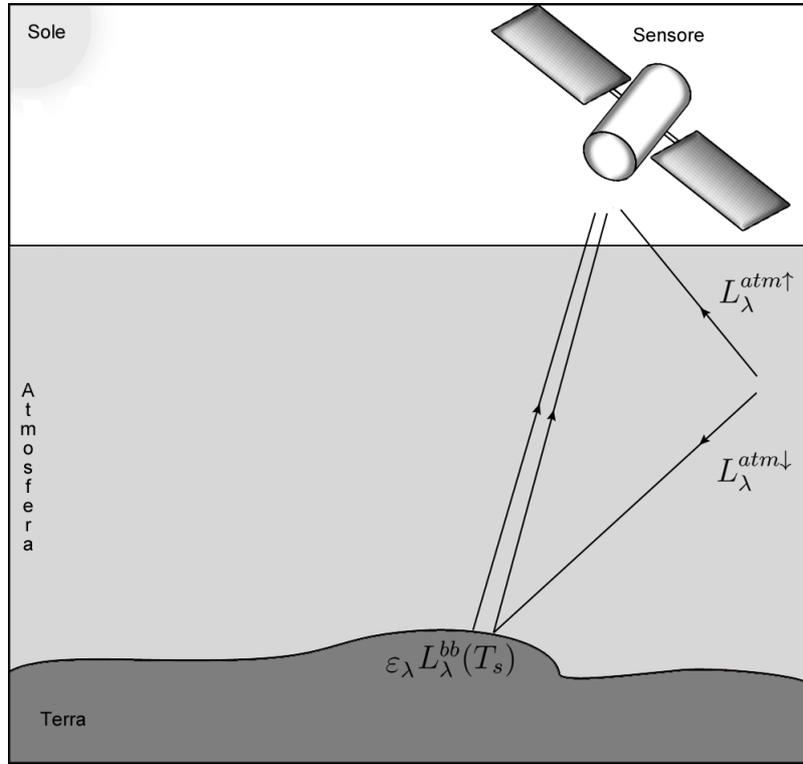
## 2.4 RTM nel TIR

Nell'infrarosso termico la radianza emessa dal suolo terrestre, considerato ad una temperatura indicativa tra i -15 e i 40 °C, assume maggiore intensità intorno ai 10  $\mu\text{m}$ , con massimi di emissione in corrispondenza di lunghezze d'onda più lunghe quanto minore è la temperatura. Al contempo, a causa dell'attenuazione nel percorrere la distanza che la separa dalla Terra, la radiazione solare assume valori sempre meno elevati al crescere della lunghezza d'onda, tanto da essere considerata pressoché ininfluenza nella zona spettrale dell'infrarosso termico se comparata all'entità della radiazione emessa dal suolo.

Formalmente, dunque, nel modello di trasferimento della radiazione nell'infrarosso termico, rispetto a quanto visto per il medio infrarosso, scompare la radiazione solare (Fig. 2.4). La relazione tra le componenti che concorrono nel dato di radianza osservato risulta essere sostanzialmente analoga al caso MIR in condizioni notturne:

$$L_\lambda = \left( \varepsilon_\lambda L_\lambda^{bb}(T_s) + \rho_\lambda L_\lambda^{atm\downarrow} \right) \tau_\lambda^{atm\uparrow} + L_\lambda^{atm\uparrow}. \quad (2.10)$$

Anche in questo caso è possibile supporre di conoscere il modo in cui l'atmosfera agisce e quindi correggere la radianza misurata tenendo conto della trasmittanza, supponendo ancora che la radiazione atmosferica diretta



**Figura 2.4:** Modello di trasferimento della radiazione

al sensore sia di grandezze di ordine inferiore. Una volta pulito il dato misurato dalla trasmittanza atmosferica, nuovamente ci si riconduce alla totalità della radiazione proveniente dalla porzione di suolo osservata, ossia alla radianza *Ground-Leaving*:

$$L_{\lambda}^{gl} = \varepsilon_{\lambda} L_{\lambda}^{bb}(T_s) + \rho_{\lambda} L_{\lambda}^{atm\downarrow}. \quad (2.11)$$

In questo modo è possibile considerare un modello di trasferimento della radiazione unico per MIR diurno, MIR notturno e TIR. Le differenze formali vengono incluse nel termine di radiazione *Environmental*, che è sempre influenzato dall'emissione atmosferica ma solo nel caso MIR diurno subisce anche l'interferenza solare. Nell'infrarosso termico quindi è inutile la distinzione tra condizioni di osservazioni diurne o notturne in quanto comunque il termine di natura solare non influenza la radiazione ambientale.

Nonostante l'uguaglianza apparente tra il modello di trasferimento della radiazione nel termico e nel medio infrarosso in condizioni notturne, la dipendenza delle grandezze dalla lunghezza d'onda comporta delle differenze di comportamenti. Nel TIR infatti si è già ampiamente sottolineato quanto la radiazione emessa da corpo nero assuma valori più importanti che nel MIR, la quale radiazione viene pesata per l'emittanza che anch'essa avrà un comportamento dipendente dalla lunghezza d'onda a seconda della tipologia di suolo considerato. Per quanto riguarda l'atmosfera, invece, la sua composizione implica comportamenti distinti sia in termini di emissione che in termini di trasmittanza, causando ad esempio anche forti assorbimenti per bande più o meno estese.

# Capitolo 3

## Separazione della Temperatura e dell'Emissività

### 3.1 Separazione della Temperatura e dell'Emissività

Nel precedente capitolo si è visto come sia possibile modellare la radianza misurata dal sensore in funzione delle varie componenti che contribuiscono alla radiazione.

Un ulteriore approfondimento del problema scaturisce dall'osservazione che la radianza misurata varia con la lunghezza d'onda, e che tale variazione non è misurabile con continuità, ma dipende dalla risoluzione spettrale dei sensori. La radianza misurata è quindi una grandezza discreta. A seconda del sensore utilizzato, vi è comunque un determinato numero di canali spettrali disponibili sui quali viene misurata la radiazione. La relazione tra la radianza *Ground-Leaving* e la radiazione misurata da un sensore reale è approfondita nel seguito (Cap. 6), in questo capitolo ci si limita a considerare come la presenza di dati discreti influisca nell'elaborazione degli stessi al fine di estrapolare i parametri di interesse radiativo. Discretizzando il modello



### 3.1.1 Linear Spectral Emissivity Constraint

Un esempio di algoritmo TES è presentato da Wang *et al.* [9]. La risoluzione del problema è assicurata da un'ipotesi di partenza basata sull'osservazione empirica di spettri di emissività. Se si suppone infatti che l'emissività sia linearizzabile a tratti, ossia se si confonde il reale andamento dell'emissività con una successione di linee spezzate, il problema si semplifica e diventa matematicamente realizzabile. L'efficacia di tale metodo è quantificabile comparando il grado di semplificazione con l'entità dell'errore che tale costrizione introduce.

Costringere l'emissività ad essere lineare a tratti significa suddividere lo spettro di osservazione in un certo numero  $K$  di sottointervalli, ciascuno contenente un numero  $m_k$  di canali spettrali. L'osservazione di spettri tipici di emissione permette di scegliere in maniera ottimale il numero dei sottointervalli nonché la loro ampiezza.

Linearizzare l'emissività all'interno di un sottointervallo significa dire che, ivi, l'emissività è univocamente rappresentabile tramite due coefficienti:

$$\varepsilon_{\lambda_j} \approx a_k \lambda_j + b_k, \quad k = 1, \dots, K; \quad j \in \left[ \sum m_k, \sum m_{k+1} \right].$$

Il sistema (3.2) si semplifica poiché le  $N_c$  equazioni avranno una temperatura e due parametri per ogni sottointervallo, ossia un numero totale di  $2K + 1$  incognite da recuperare.

La risoluzione del sistema è affidata alla minimizzazione di una funzione di costo che quantifica lo scarto quadratico medio tra la radiazione effettivamente misurata e quella ottenuta tramite i coefficienti stimati. Le coppie  $(a_k, b_k)$  ottimali e la temperatura  $T_s$  stimata saranno quelle in corrispondenza delle quali cioè l'errore quadratico medio relativo alla radianza al sensore è minimo:

$$E = \sum_{j=1}^{N_c} \left[ \hat{L}_{\lambda_j}^{gl}(a_k, b_k, T_s) - L_{\lambda_j}^{gl} \right]^2.$$

Più specificamente, la minimizzazione avviene nel seguente modo. Per ogni sottointervallo spettrale viene supposta un'emissività di partenza unitaria, ossia si estrapola la temperatura massima di *Brightness*  $T_b$  invertendo la legge di Planck (1.3). La temperatura  $T_b$  è il punto di partenza del metodo iterativo di risoluzione della minimizzazione della funzione di costo. Essa viene utilizzata per ricavare l'emissività spettrale in corrispondenza di ogni lunghezza d'onda disponibile tramite la semplice inversione del modello di trasferimento della radiazione:

$$\varepsilon_{\lambda_j} = \frac{L_{\lambda_j}^{gl} - L_{\lambda_j}^{env}}{L_{\lambda_j}^{bb}(T_b) - L_{\lambda_j}^{env}}.$$

Le coppie di valori  $(\varepsilon_{\lambda_j}, \lambda_j)$  vengono utilizzate all'interno di ciascun sottointervallo per ottenere i coefficienti  $a_k, b_k$  tramite un processo di approssimazione ai minimi quadrati. I coefficienti vengono a loro volta utilizzati per stimare la radianza misurata al sensore  $\hat{L}_{\lambda_j}^{gl}(a_k, b_k, T_b)$ , la quale è necessaria per quantificare il costo.

$$\hat{L}_{\lambda_j}^{gl} = (a_k \lambda_j + b_k) L_{\lambda_j}^{bb}(T_s) + (1 - (a_k \lambda_j + b_k)) L_{\lambda_j}^{env},$$

$$k = 1, \dots, K; \quad j \in \left[ \sum m_k, \sum m_{k+1} \right].$$

Il processo vero e proprio di minimizzazione consiste nel perturbare il valore di temperatura di partenza in maniera tale da ottenere i coefficienti ottimali. L'entità della perturbazione è calcolabile valutando la derivata del costo rispetto alla temperatura. Se infatti tale derivata è non nulla (o più precisamente in modulo superiore ad una soglia prefissata), viene valutato l'incremento/decremento di temperatura in modo tale che essa si annulli. Variando in questa maniera la temperatura di *Brightness* si ottiene un secondo valore di temperatura per il quale viene eseguito nuovamente il ciclo appena descritto. Quando la derivata del costo rispetto alla temperatura si mantiene

al di sotto della soglia prefissata, le coppie di coefficienti  $a_k$  e  $b_k$  in funzione dei quali ciò avviene costituiscono i valori ottimali recuperati dall'algoritmo.

### 3.1.2 Empirical Orthogonal Functions

La soluzione proposta nel precedente paragrafo, però, come la maggioranza degli algoritmi di separazione di temperatura ed emissività, è pensata per lavorare nel TIR. Sebbene il modello di trasferimento della radiazione nell'infrarosso termico sia analogo a quello del medio infrarosso in condizioni notturne, nella pratica però i valori delle radianze che concorrono nel dato osservato sono molto distinti da quelli del MIR notturno, poiché l'entità della radiazione emessa nel termico è profondamente diversa da quella nel medio infrarosso (Fig. 2.2). Nondimeno, si può rendere necessario l'impiego di algoritmi per stimare l'emissività superficiale anche nel MIR.

Potendo disporre di osservazioni relative all'intera gamma dell'infrarosso, sicuramente una possibile soluzione sarebbe quella di estrapolare la temperatura superficiale nella zona del termico con gli algoritmi già esistenti ed utilizzarla per rendere risolvibile il problema della separazione nel MIR. Un'alternativa è indicata Zhou *et al.* in [10] e presuppone l'utilizzo di un vasto database con il quale confrontare i dati osservati, utilizzando un dominio di autovettori della radianza osservata per diminuire l'onere computazionale.

Le *Empirical Orthogonal Functions* (EOF) sono gli autovettori della matrice di covarianza della radianza misurata. L'utilizzo di una base di autovettori permette di rappresentare in maniera più efficiente i contributi di misurazioni iperspettrali. Nello spazio identificato dalle EOF sono definiti dei parametri di stato atmosferico ricavati sulla base di un vasto database di misurazioni. Il dato misurato, rappresentato nel dominio degli autovettori, viene confrontato con i valori di stato atmosferico del database per recuperare il più prossimo. In questo modo si ottiene un punto di partenza, un

*first guess* sul quale poi effettuare un'inversione del modello di trasferimento della radiazione o un algoritmo di affinamento TES per estrapolare i dati di emissività e temperatura superficiale.

Con un opportuno database tale metodo è ovviamente allargabile al recupero di altri parametri non solo superficiali, ma ad esempio caratteristiche microfisiche e radiative di nuvole.

### 3.1.3 Iterative Spectrally Smooth

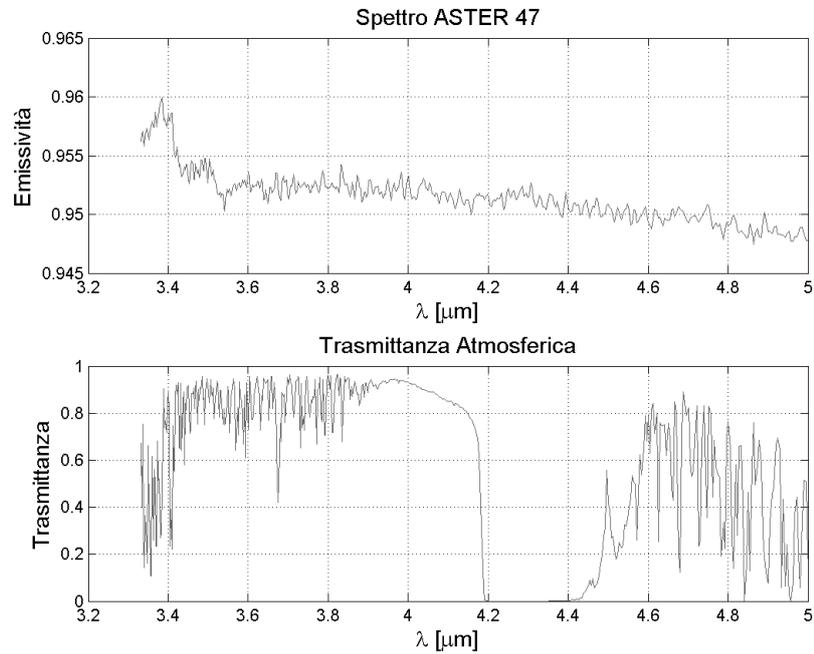
Un'ulteriore approccio nell'affrontare e risolvere il problema della separazione della temperatura e dell'emissività spettrale nel medio infrarosso è proposto da Cheng *et al.* [8] e suppone semplicemente di estendere nel MIR algoritmi pensati nel TIR. Un primo algoritmo considerato è l'Iterative Spectrally Smooth, risultato del lavoro di Borel [11].

Borel osserva che la radianza *Ground-Leaving* varia più lentamente di quella *Environmental*, ossia appare più attenuata (*smooth*) rispetto alla lunghezza d'onda. Il supporto teorico a questa constatazione risiede nella natura delle emissioni atmosferiche comparate con quelle terrestri.

In figura (Fig. 3.1) è apprezzabile la differenza dei range di valori assunti dalla trasmittanza atmosferica rispetto all'emissività dello spettro 47 della libreria ASTER.

Onde sfruttare la differente velocità di variazione delle emissioni che concorrono nella radianza misurata dal sensore, Borel introduce un parametro di *smoothness*  $S$  che tiene appunto conto di questa proprietà:

$$S(T_s) = \sum_{j=2}^{N_c-1} \left( \varepsilon_j(T_s) - \frac{\varepsilon_{j-1}(T_s) + \varepsilon_j(T_s) + \varepsilon_{j+1}(T_s)}{3} \right)^2.$$



**Figura 3.1:** Confronto tra spettro di emissività e trasmittanza atmosferica nel MIR

L'algoritmo presentato da Borel si basa sulla ricerca iterativa di valori di emissività di prova la cui bontà è espressa proprio dal parametro di *smoothness*. Il primo passo, necessario per avviare l'algoritmo, è ricavarsi una temperatura di riferimento. Una possibile via, solitamente utilizzata in situazioni analoghe nel campo del telerilevamento, consiste nel considerare la temperatura superficiale relativa ad un'emissività costante pari a 0.95. Fissando il valore dell'emissività spettrale ed invertendo il modello di trasferimento della radiazione si ottengono dunque tante temperature quanti sono i canali spettrali. Queste possono essere mediate o alternativamente è conveniente scegliere il massimo valore tra esse, e si ottiene la temperatura di riferimento necessaria.

Si sceglie adesso una precisione di temperatura desiderata e si costruisce un vettore di temperature centrato nel riferimento ricavato al passo precedente e con distanza pari alla precisione desiderata. In corrispondenza di ogni valore di temperatura appartenente al vettore viene valutata l'emissi-

vità spettrale invertendo il modello di trasferimento della radiazione:

$$\varepsilon_\lambda = \frac{L_\lambda^{gl} - L_\lambda^{env}}{L_\lambda^{bb}(T_s) - L_\lambda^{env}}. \quad (3.3)$$

Si procede indi al calcolo del parametro di *smoothness* per ciascuna delle emissività ricavate, ottenendo un valore di  $S$  per ogni valore di temperatura appartenente al vettore. Un errore nella stima della temperatura implica la presenza di residui atmosferici nell'emissività spettrale, con la conseguenza di renderne lo spettro meno *smooth*. È chiaro a questo punto che il risultato dell'algoritmo di Borel prevede la scelta della temperatura che minimizza il parametro di *smoothness* quale stima ottimale, per cui semplicemente:

$$\hat{T}_s = \arg \min_{T_s} \{S\},$$

$$\hat{\varepsilon}_\lambda = \frac{L_\lambda^{gl} - L_\lambda^{env}}{L_\lambda^{bb}(\hat{T}_s) - L_\lambda^{env}}.$$

### 3.1.4 Algoritmo Stepwise Refining

Il criterio di *smoothness* introdotto da Borel ha aperto le porte a più algoritmi che, seppur in maniera distinta, si basano sul medesimo principio. Kanani *et al.* [12] provano a modificare il parametro  $S$  valutandone semplicità di calcolo ed efficacia di risultati. Cheng *et al.* [13] propongono un distinto metodo di affinamento della stima per passi successivi. Tale metodo è denominato *Stepwise Refining SR*. Il suo funzionamento è supportato dalla considerazione che in una zona spettrale sufficientemente stretta si commette un errore trascurabile se la legge di Planck (1.3) si approssima ad una retta e, inoltre, l'emissività spettrale varia talmente lentamente da poter essere considerata con buona approssimazione costante:

$$L_\lambda^{bb}(T_s) \approx \alpha \cdot \lambda, \quad \varepsilon_\lambda \approx \varepsilon \quad \lambda \in W.$$

Conseguentemente il modello di trasferimento della radiazione, relativa-

mente ad una generica finestra atmosferica, si aggiorna in base alle assunzioni appena ipotizzate:

$$L_{\lambda}^{gl} = \varepsilon\alpha\lambda + (1 - \varepsilon)L_{\lambda}^{env}. \quad (3.4)$$

Il parametro  $\alpha$  è l'incognita da ricavare, ma la sua dipendenza intrinseca dall'emissività, anch'essa ignota, è la traduzione dell'irrisolvibilità del problema della separazione nella particolare forma in cui le approssimazioni assunte lo hanno trasformato. Ciò è eloquente se si isola il termine lineare, ossia la radianza di corpo nero:

$$\alpha\lambda = \frac{L_{\lambda}^{gl} - (1 - \varepsilon)L_{\lambda}^{env}}{\varepsilon}. \quad (3.5)$$

Dalla (3.5) si evince anche che il valore reale di emissività deve essere tale da permettere di ottenere una relazione lineare con la lunghezza d'onda.

L'algoritmo SR divide in più passaggi a precisione crescente i tentativi per recuperare il valore di emissività che garantisca la linearità. Al primo step infatti viene valutata l'espressione di destra della (3.5) per valori di emissività di prova compresi tra 0 e 1 intervallati di 0.1. La distanza tra le funzioni ottenute e le relative interpolazioni lineari ricavate misura l'aderenza dei valori di emissività scelti. Se tale distanza è considerevole, significa che vi è un residuo atmosferico che ha l'effetto di allontanare la funzione dal comportamento lineare. Se tale distanza è minima invece è minimo anche il residuo atmosferico, ossia si è in presenza del valore di emissività più prossimo a quello reale.

Il primo step prevede dunque l'elezione di un candidato ad essere l'emissività finale minimizzando la distanza dal comportamento lineare. Nel secondo step si costruisce un secondo vettore di emissività di prova, centrato nel candidato ricavato in uscita al primo step, e con precisione 0.01. Nuovamente vengono calcolate le distanze tra le funzioni in corrispondenza dei valori di emissività di prova e delle rispettive interpolazioni lineari, e nuovamente si elegge un candidato ad essere la stima dell'emissività.

Si ripete iterativamente l'algoritmo fino ad arrivare ad un ordine accettabile di precisione, solitamente scelto al termine della quarta iterazione.

L'emissività ricavata è supposta essere la più aderente a quella reale all'interno della finestra atmosferica considerata. Da questo valore è recuperabile la radianza di corpo nero invertendo il modello di trasferimento della radiazione:

$$L_{\lambda}^{bb}(T_s) = \frac{L_{\lambda}^{gl} - (1 - \varepsilon)L_{\lambda}^{env}}{\varepsilon}.$$

Successivamente, dalla radianza di corpo nero, si ottiene in seguito la temperatura invertendo la legge di Planck (1.3):

$$T_s = \frac{hc}{\lambda k} \ln \left[ -1 - \frac{2hc^2}{\lambda^5 L_{\lambda}^{bb}(T_s)} \right]. \quad (3.6)$$

Una volta stimato il valore della temperatura il sistema di equazioni per l'estrapolazione dei parametri di interesse radiativo è semplificato e risolvibile:

$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{L_{\lambda}^{gl} - L_{\lambda}^{env}}{L_{\lambda}^{bb}(T_s) - L_{\lambda}^{env}}.$$

Nell'infrarosso termico Cheng *et al.* [13] indicano sei finestre atmosferiche e le relative ampiezze sulle quali effettuare l'SR. Esse sono determinate considerando l'aderenza delle approssimazioni di linearizzazione e di costanza relativamente alla radianza di corpo nero e all'emissività rispettivamente, nonché la presenza di forti linee di emissione atmosferica, così da amplificare l'effetto dei residui atmosferici, che diventano più facilmente rilevabili. Ossia, si scelgono finestre che, relativamente alla applicabilità delle approssimazioni, esaltino la differenza di *smoothness* tra le due radianze *Ground-Leaving* ed *Environmental*.

Le diverse temperature ricavate per ciascuna finestra sono successivamente mediate per ottenere il valore finale da utilizzare nel recupero dell'emissività spettrale.

# Capitolo **4**

## Estensione dell'Algoritmo Stepwise Refining nel MIR

### 4.1 Estendibilità del Criterio di Smoothness nel MIR

In questo elaborato di laurea si è valutato nella fattispecie l'algoritmo Extended Stepwise Refining, ovverosia l'estensione nel medio infrarosso dell'algoritmo Stepwise Refining, pensato invece per lavorare con dati nel termico. Sebbene il principio di funzionamento rimanga invariato, vi è un cambiamento importante nel passaggio dalla due zone spettrali. Se formalmente il modello di trasferimento della radiazione non assume alcuna variazione, come si è precedentemente sottolineato (Cap. 2), vi è una sostanziale differenza dovuta alla interferenza non più ininfluenza della radiazione solare. Vi è quindi un distinguo tra le osservazioni in condizioni diurne e notturne, e a tener conto di queste variazioni è il termine di radianza *Environmental* che comprenderà o meno la radiazione solare.

Nondimeno, sia il contributo atmosferico quanto quello di emissione, che pure appaiono inalterati rispetto al modello nel termico, hanno comporta-

menti variabili con la lunghezza d'onda, e non è affatto assicurato che conservino le medesime caratteristiche che hanno nel termico inalterate nel medio infrarosso. Ci si impone quindi una obbligata riflessione di partenza: la proprietà di *smoothness* considerata nel TIR è effettivamente riscontrabile anche nel MIR? Ovvero, considerando la componente solare aggiuntiva nonché le differenti emissioni atmosferiche e terrestri, è comunque possibile effettuare una discriminazione tra la radianza *Ground-Leaving* e quella *Environmental* in base ad un criterio di *smoothness*? Per provare a dare una risposta a questa domanda sono state effettuate delle serie di simulazioni preliminari.

I dati relativi alle radianze sono stati ricavati mediante simulazioni MODTRAN (App. A), mentre gli spettri di emissività sui quali sono stati effettuati i test appartengono alle librerie spettrali ASTER e MODIS (App. B). Al fine di valutare l'andamento della radianza *Environmental* sono stati presi in considerazione diversi modelli atmosferici, con i valori dei parametri riportati in tabella, secondo quanto indicato da Cheng *et al.* in [8]. In particolare le temperature sono state scelte in accordo ai valori di default che MODTRAN associa al livello atmosferico inferiore relativamente a ciascun modello considerato.

Mid-Latitude Summer	(N 45°, E 245°)	T=294.2 K
Mid-Latitude Winter	(N 45°, E 245°)	T=272.2 K
Sub-Artic Summer	(N 60°, E 245°)	T=287.2 K
Sub-Artic Winter	(N 60°, E 245°)	T=257.2 K
Tropical Atmosphere	(N 15°, E 245°)	T=299.7 K
1976 US Standard Atmosphere	(N 45°, E 245°)	T=288.2 K
Julian Day		180
Greenwich Time		4

**Tabella 4.1:** Simulazione I

Lo scopo di queste simulazioni preliminari è dunque mettere in risalto le caratteristiche spettrali delle radianze *Ground-Leaving* ed *Environmental* onde valutarne, in prima analisi, la possibilità di discernere i due spettri

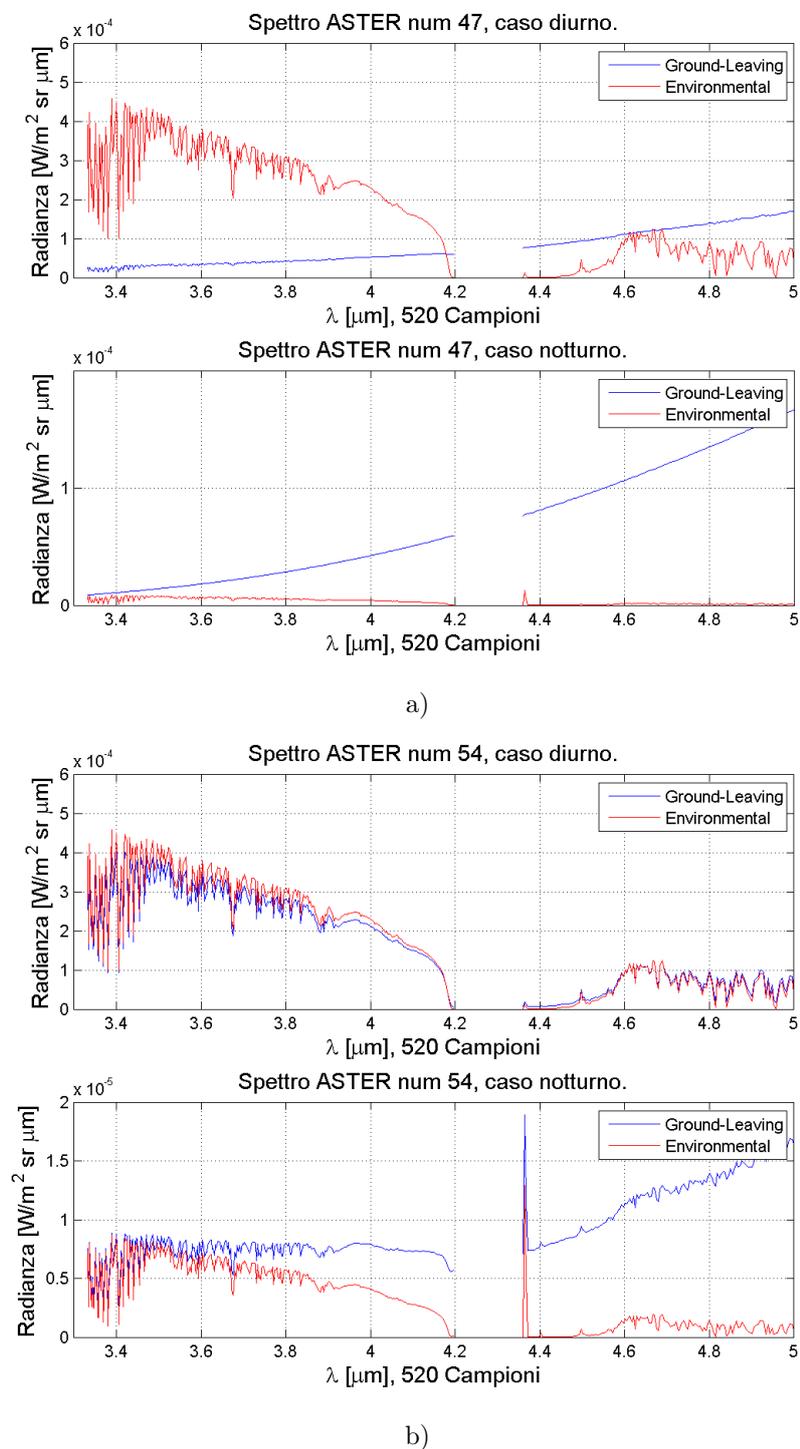
sulla base di criteri di *smoothness*. Di seguito sono rappresentati due casi esemplificativi che generalizzano quelli che sono gli andamenti tipici delle radianze al variare degli spettri di emissività utilizzati (Fig. 4.1).

Il primo spettro di emissività considerato nell'esempio corrisponde al numero 47 della libreria ASTER, ovvero sia all'emissività del materiale *Gloss Black Paint*. Il comportamento delle radianze in questo caso appare effettivamente analizzabile in base alla variabilità dei contributi. Sia per quanto riguarda le condizioni diurne che notturne infatti la radianza *Environmental* presenta variazioni molto più veloci e in un intervallo di valori più ampio (Fig. 4.1 a) rispetto a quella *Ground-Leaving*, per cui il principio di applicazione dell'algoritmo Stepwise Refining appare estendibile con efficacia nel medio infrarosso.

Le medesime conclusioni non sussistono però per spettri quale il 54 della libreria ASTER (*Brass Plate*). In questo caso appare evidente che le profonde similitudini tra gli andamenti delle due radianze non permettono di individuarne uno maggiormente *smooth* (Fig. 4.1 b), rendendo pertanto improbabile una divisione efficace dei due contributi in base ad un criterio di *smoothness*.

L'esempio riportato relativamente ai due spettri mostrati è relativo al caso di modello atmosferico 1976 US Standard. Per quanto concerne gli altri modelli atmosferici i risultati sono analoghi, ossia in questa fase la scelta del modello atmosferico incide in maniera poco apprezzabile sull'andamento delle radianze e della loro variabilità.

Ciò che invece influenza il risultato di questa serie di simulazioni sono i valori di emissività degli spettri. Le due emissività considerate sono estremamente rappresentative dei casi standard, gli altri spettri delle librerie ASTER e MODIS presentano risultati anche intermedi ma prevalentemente assomigliano maggiormente o ad uno o all'altro caso proposto. Si è osservato infatti che spettri che seguono il comportamento mostrato da quello ASTER numero



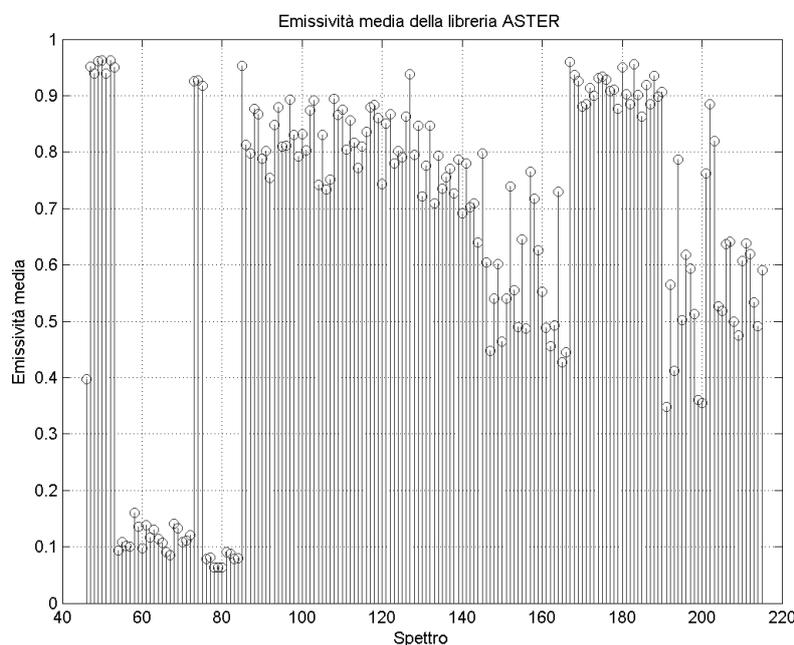
**Figura 4.1:** Simulazione delle radianze *Ground-Leaving* ed *Environmental* relative alle emissività spettrali a) ASTER 47 e b) ASTER 54

47 sono quelli che posseggono una alta emissività spettrale media, mentre il comportamento dello spettro ASTER numero 54 è condiviso da quegli spettri la cui emissività media si mantiene piuttosto bassa.

Prima di concludere questo paragrafo è opportuno precisare il motivo dell'assenza di valori nella finestra spettrale  $4.15 \div 4.55 \mu\text{m}$ . Tale zona è difatti caratterizzata dal forte assorbimento della molecola di diossido di carbonio  $\text{CO}_2$ . L'assorbimento atmosferico è inglobato nel termine di trasmittanza che, pertanto, in questa determinata zona spettrale, appare praticamente nullo. Ovverosia la radiazione ivi è quasi interamente assorbita dall'atmosfera e non ne viene trasmessa che una quantità ridicola. Di conseguenza, quando in seguito avviene la correzione del dato osservato, attraverso una normalizzazione rispetto alla trasmittanza atmosferica, in tale finestra, a causa della presenza di anidride carbonica, il sensore restituisce radianze praticamente nulle. È per questo motivo che i dati che cadono in questo intervallo spettrale sono inutilizzabili, e non vengono presi in considerazione.

Il risultato della prima serie di simulazioni evidenzia che il valor medio di emissività dello spettro considerato influisce considerevolmente sulla capacità di distinguere le radianze *Ground-Leaving* ed *Environmental* secondo un criterio di *smoothness*. Da tale osservazione scaturisce l'immediata suddivisione degli spettri di emissività in base al loro valor medio. In particolare in questa prima fase si è voluto utilizzare la massima risoluzione spettrale possibile, pertanto sono stati considerati solo le emissività della libreria ASTER a partire dalla 46-ima, in quanto le prime 45 emissività dispongono di 84 campioni nell'intervallo spettrale considerato ( $3.3 \div 5.0 \mu\text{m}$ ) contro i 520 delle altre.

Si è dunque proceduto a valutare le emissività medie  $em$  di tutti gli spettri della libreria ASTER (Fig. 4.2), che sono poi stati suddivisi in base ai valori secondo quanto descritto nella seguente tabella:

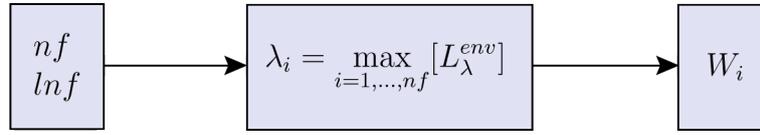


**Figura 4.2:** Emissività media degli spettri della libreria ASTER dal 46 al 215

<i>High</i>	$em \geq 0.7$	Alta emissività media
<i>Middle</i>	$0.7 > em \geq 0.2$	Media emissività media
<i>Low</i>	$em < 0.2$	Bassa emissività media

## 4.2 Estensione dell'Algoritmo Stepwise Refining

Nella realizzazione l'algoritmo è suddiviso in due moduli principali. In primo luogo vi è la necessità di determinare dove applicarlo, per cui si è creato un modulo di ricerca automatica delle finestre atmosferiche (Fig. 4.3). La precisione del recupero dell'emissività è ovviamente più accurata quanto più la linea atmosferica è marcata, per cui, definiti i parametri quali il numero di finestre  $nf$  e la loro estensione in termini di campioni  $lnf$ , il modulo di ricerca restituisce le collocazioni delle finestre atmosferiche.

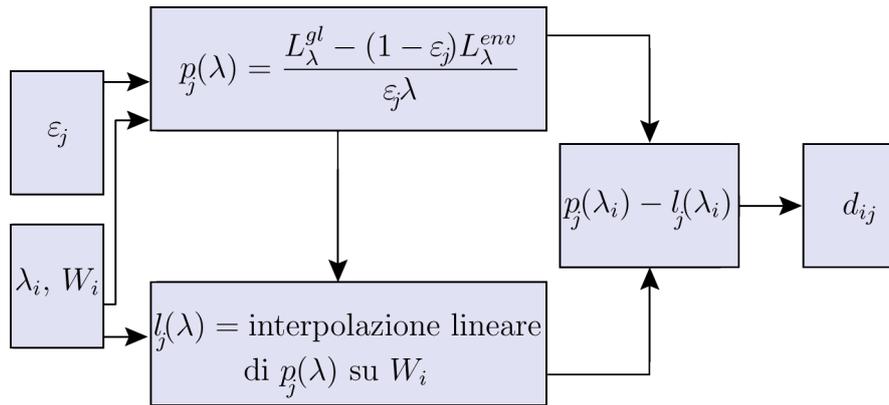


**Figura 4.3:** Modulo per la ricerca delle finestre atmosferiche

Il secondo passo costituisce il vero e proprio Stepwise Refining (Fig. 4.4). Si definisce un vettore di emissività di prova:

$$\varepsilon_{testI} = [0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1].$$

Per ogni finestra atmosferica, il secondo modulo preleva ciclicamente i valori del vettore  $\varepsilon_{testI}$  e restituisce la distanza dal comportamento lineare  $d_{ij}$  che tali valori implicano.



**Figura 4.4:** Step dell'ESR

Lo *step* si conclude andando a paragonare i valori delle distanze ricavate per ognuno dei valori di prova e scegliendo il minimo, ottenendo quindi un valore di emissività ottimale  $\hat{\varepsilon}_{stepI}$ . Per ciascuna finestra atmosferica, tale valore è il riferimento sul quale formare un successivo vettore di prova:

$$\varepsilon_{testII} = [\hat{\varepsilon}_{stepI} - 0.05, \hat{\varepsilon}_{stepI} - 0.04, \dots, \hat{\varepsilon}_{stepI}, \dots, \hat{\varepsilon}_{stepI} + 0.04].$$

Il secondo vettore di prova rientra nel modulo che effettua lo step dell'SR e di nuovo, confrontando le varie distanze, si ottiene un valore  $\hat{\varepsilon}_{stepII}$ , utiliz-

zato successivamente per costruire un terzo vettore di test. Al quarto step, ossia al recupero di un'emissività con precisione dell'ordine di  $10^{-4}$ , il valore  $\hat{\epsilon}_{stepIV}$  è assunto essere quello definitivo.

Per completare il recupero dei parametri, come si è detto, si ricava la temperatura superficiale  $\hat{T}_s$  mediando quelle ottenute da ciascuna finestra atmosferica tramite la (3.6), e da questa stima si inverte l'RTM (3.3) per ottenere l'emissività spettrale lungo tutta la zona di interesse.

### 4.3 Finestre Atmosferiche

Prima di inoltrarci nell'analisi delle prestazioni dell'Extended Stepwise Refining, è d'uopo una riflessione sul primo modulo dell'algoritmo, ossia sulla individuazione delle finestre atmosferiche. Per quanto concerne l'infrarosso termico, Cheng *et al.* indicano sei finestre atmosferiche di diversa estensione, nelle quali viene effettuato il recupero delle emissività. Nel medio infrarosso si è ipotizzato di continuare la strada intrapresa in [14] ed implementare una ricerca automatica delle finestre in base ai contributi massimi di radianza *Environmental*. Il procedimento è piuttosto semplice, è sufficiente identificare i massimi valori assunti dalla radianza *Environmental* e ricavarne le lunghezze d'onda relative. Con questo metodo si ottengono quelle che possono essere considerate potenziali lunghezze d'onda centrali, intorno alla quali successivamente costruire le finestre atmosferiche necessarie per il corretto funzionamento dell'algoritmo.

Il motivo per cui la scelta delle finestre atmosferiche è fatta in corrispondenza dei massimi valori di radianza *Environmental* è piuttosto ovvio. Dal momento che l'algoritmo funziona sfruttando la differenza di *smoothness*, andando a pesare l'entità del residuo atmosferico (o, più correttamente, nel medio infrarosso, residuo ambientale), è immediato osservare che è proprio in corrispondenza dei picchi maggiori di radianza *Environmental* che tale re-

siduo diventa più facilmente individuabile e, di conseguenza, eliminabile.

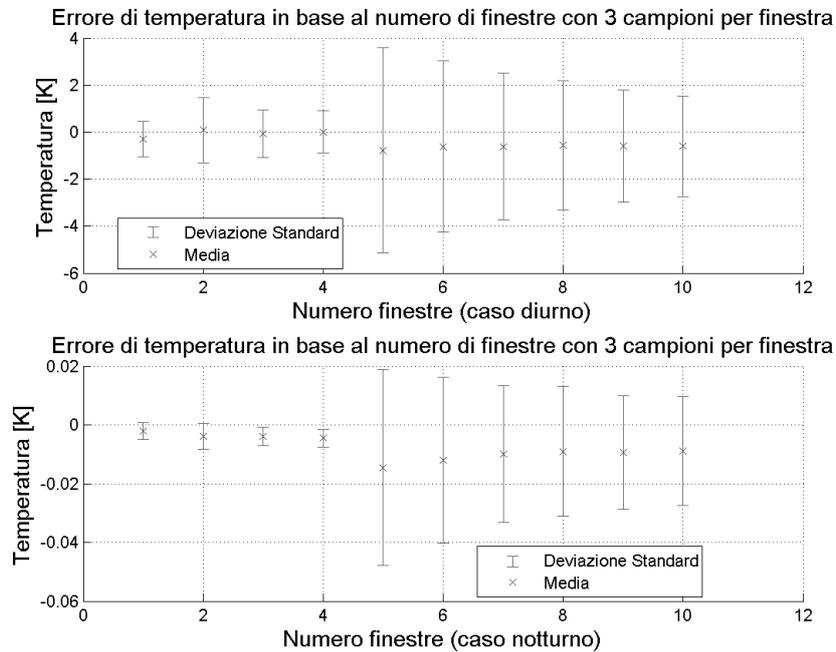
Rimane dunque da definire quante debbano essere suddette finestre al fine di ottenere una stima il più accurato possibile, nonché quanto debbano estendersi in termini di campioni, ossia la loro ampiezza spettrale.

Al fine di determinare i parametri ottimali sono state effettuate numerose simulazioni incrociate. Il modello atmosferico considerato è il 1976 US Standard, con temperatura 288.2 K. Gli altri parametri sono i medesimi della tabella (Tab. 4.1) relativamente al suddetto modello atmosferico.

Si rammenta inoltre che la risoluzione spettrale considerata è mediamente intorno ai 3 nm, per cui una finestra contenente tre campioni spettrali corrisponde ad un'estensione di circa 6 nm. I risultati ottenuti vengono considerati esclusivamente per scegliere i valori dei parametri relativi alle finestre atmosferiche, in questa prima fase, infatti, si vogliono solo determinare le condizioni ottimali per l'esecuzione dell'algoritmo. Eventuali considerazioni sulla bontà delle stime ricavate non vengono prese in considerazione in questo paragrafo ma verranno discusse nel seguito.

Ciò che si vuole sottolineare in questa simulazione è che, andando ad evidenziare i risultati per spettri ad emissività medio-alte nei casi diurni e notturni, i valori più accurati portano alla scelta di considerare solo tre finestre atmosferiche, ciascuna contenente sette campioni, ossia circa 18 nm di estensione. Evidentemente ulteriori finestre spettrali, costruite in corrispondenza di valori di radianza *Environmental* inferiori, aggiungono una indeterminazione nel recupero della temperatura, pertanto appare decisamente conveniente utilizzare un numero ristretto di finestre. I valori rappresentati nelle seguenti tabelle Tab. 4.2 e Tab. 4.3, infatti, si fermano alle prime quattro finestre, perché a partire dalla quinta finestra in poi, i risultati subiscono un peggioramento deciso (Fig. 4.5).

L'estensione delle finestre, invece, deve essere tale da soddisfare tutte



**Figura 4.5:** Variazione delle prestazioni dell'ESR al variare del numero di finestre atmosferiche con 3 campioni per finestra

le ipotesi dell'algoritmo. Le approssimazioni di linearità della funzione di Planck e di costanza per l'emissività sulle quali si basano gli algoritmi Stepwise Refining implicano l'utilizzo di finestre sufficientemente strette. Inoltre bisogna considerare il contributo di radianza ambientale, ossia sarebbe opportuno effettuare scelte in cui vi sia un unico picco di emissione atmosferica e che sia interamente compreso dall'ampiezza della finestra, al fine di rendere più efficace la sua individuazione. E, di conseguenza, la sua rimozione, restituendo una stima più aderente al valore reale.

Per quanto concerne l'estensione delle finestre atmosferiche è necessario specificare la seguente considerazione, onde giustificare la scelta effettuata. In questo elaborato è stato scelto di considerare un'estensione costante per ciascuna finestra, ma non si esclude affatto la possibilità di considerare lunghezze distinte in relazione alle finestre considerate. Tuttavia, un'analisi di questo tipo presuppone una attenta ed approfondita conoscenza delle cau-

se delle linee di emissione ambientali. È necessario cioè poter identificare le varie tipologie di sorgenti che provocano le emissioni massime di radianza *Environmental*, considerare inoltre eventuali adiacenze di emissioni, e valutare dunque l'estensione ottimale per ciascuna finestra. E riconsiderare nuovamente il numero di finestre da utilizzare. Tale soluzione però risulta essere fortemente legata alla tipologia di modello atmosferico considerato, nonché alla condizione diurna o notturna, in quanto la luce solare agisce anche attenuando il contrasto spettrale atmosferico. Pertanto, allo scopo di ottenere un modello il più generale possibile, e con la considerazione che un cambiamento di ampiezza delle finestre si ripercuote comunque con variazioni qualitative dell'ordine di pochi decimi di grado al netto di una effettiva complicazione dell'algoritmo, si è scelto di considerare un numero costante di campioni per finestra.

Riassumendo quanto detto sino ad ora, in questo paragrafo sono state effettuate le scelte dei parametri relativi alle finestre atmosferiche. In seguito a delle simulazioni, si è potuto scegliere il numero di finestre ottimale e la relativa estensione. Nelle simulazioni successive si farà sempre riferimento ai risultati di queste simulazioni, e l'algoritmo Extended Stepwise Refining verrà applicato su tre distinte finestre spettrali, centrate nelle lunghezze d'onda in corrispondenza dei quali la radianza *Environmental* assume valore massimo, e con un estensione di circa 18 nm, per un totale di sette campioni per finestra.

## 4.4 Indici Prestazionali

La valutazione delle prestazioni dell'algoritmo Extended Stepwise Refining deve essere considerata in relazione all'aderenza delle stime di emissività e temperatura ricavate rispetto ai valori reali considerati. Si rende dunque necessario l'introduzione di indici prestazionali atti appunto ad esprimere tale aderenza, e cioè valutare la bontà delle stime recuperate.

Campioni	3 ~6 nm	5 ~12 nm	7 ~18 nm	9 ~24 nm	11 ~30 nm
1 finestra					
<i>High</i>					
$\mathbb{E}[\hat{T}_s], [\text{K}]$	287.8963	287.8692	288.1131	288.7870	288.7530
$\sigma[\hat{T}_s], [\text{K}]$	0.7463	0.8419	0.6996	1.0426	0.8380
<i>Middle</i>					
$\mathbb{E}[\hat{T}_s], [\text{K}]$	287.7753	287.7860	287.9868	290.3288	290.1801
$\sigma[\hat{T}_s], [\text{K}]$	0.7444	1.0285	1.1254	2.3871	1.5328
<i>Low</i>					
$\mathbb{E}[\hat{T}_s], [\text{K}]$	342.8580	339.4364	337.7328	342.1484	337.5526
$\sigma[\hat{T}_s], [\text{K}]$	58.8716	57.0599	58.4768	59.3316	58.2613
2 finestre					
<i>High</i>					
$\mathbb{E}[\hat{T}_s], [\text{K}]$	288.5269	288.5816	288.3176	288.4486	288.3716
$\sigma[\hat{T}_s], [\text{K}]$	1.1794	0.6425	0.4485	0.4729	0.5230
<i>Middle</i>					
$\mathbb{E}[\hat{T}_s], [\text{K}]$	288.3615	288.9440	288.2185	288.7940	288.7901
$\sigma[\hat{T}_s], [\text{K}]$	2.3289	1.5601	0.6206	1.0898	1.0023
<i>Low</i>					
$\mathbb{E}[\hat{T}_s], [\text{K}]$	341.7729	337.6712	336.3181	337.9193	335.4482
$\sigma[\hat{T}_s], [\text{K}]$	52.2507	56.0658	57.1773	57.1341	57.7554

Campioni	3	5	7	9	11
	~6 nm	~12 nm	~18 nm	~24 nm	~30 nm
3 finestre					
<i>High</i>					
$\mathbb{E}[\hat{T}_s], [\text{K}]$	288.3146	288.3975	288.2110	288.2473	288.2600
$\sigma[\hat{T}_s], [\text{K}]$	0.8300	0.4131	0.3248	0.3179	0.3404
<i>Middle</i>					
$\mathbb{E}[\hat{T}_s], [\text{K}]$	288.0394	288.4346	287.9911	288.3002	288.3663
$\sigma[\hat{T}_s], [\text{K}]$	1.6119	1.0909	0.5138	0.5858	0.6054
<i>Low</i>					
$\mathbb{E}[\hat{T}_s], [\text{K}]$	343.3167	339.4756	338.9048	339.7750	338.1422
$\sigma[\hat{T}_s], [\text{K}]$	52.3189	54.9491	55.4333	56.5252	57.2446
4 finestre					
<i>High</i>					
$\mathbb{E}[\hat{T}_s], [\text{K}]$	288.4075	288.4999	288.4009	288.1821	288.3623
$\sigma[\hat{T}_s], [\text{K}]$	0.6441	0.4026	0.3005	0.2888	0.3878
<i>Middle</i>					
$\mathbb{E}[\hat{T}_s], [\text{K}]$	288.0881	288.3300	288.3531	288.1140	288.6754
$\sigma[\hat{T}_s], [\text{K}]$	1.5455	1.4861	0.7217	0.7899	0.7756
<i>Low</i>					
$\mathbb{E}[\hat{T}_s], [\text{K}]$	339.6956	336.8524	336.3381	338.2032	337.1257
$\sigma[\hat{T}_s], [\text{K}]$	51.8853	54.3631	54.7332	55.8140	56.3412

**Tabella 4.2:** Analisi delle prestazioni dell'algoritmo al variare del numero e dell'estensione delle finestre atmosferiche nel caso diurno

Campioni	3 ~6 nm	5 ~12 nm	7 ~18 nm	9 ~24 nm	11 ~30 nm
1 finestra					
<i>High</i>					
$\mathbb{E}[\hat{T}_s], [\text{K}]$	288.1978	288.1964	288.1938	288.1849	288.1896
$\sigma[\hat{T}_s], [\text{K}]$	0.0031	0.0031	0.0041	0.0114	0.0076
<i>Middle</i>					
$\mathbb{E}[\hat{T}_s], [\text{K}]$	288.1979	288.1953	288.1897	288.1670	288.1759
$\sigma[\hat{T}_s], [\text{K}]$	0.0015	0.0050	0.013	0.0601	0.0308
<i>Low</i>					
$\mathbb{E}[\hat{T}_s], [\text{K}]$	294.3970	294.4215	294.3760	294.3610	294.3598
$\sigma[\hat{T}_s], [\text{K}]$	7.9696	7.9493	7.9866	7.9987	8.0000
2 finestre					
<i>High</i>					
$\mathbb{E}[\hat{T}_s], [\text{K}]$	288.1968	288.1946	288.1976	288.1965	288.1985
$\sigma[\hat{T}_s], [\text{K}]$	0.0041	0.0036	0.0031	0.0048	0.0049
<i>Middle</i>					
$\mathbb{E}[\hat{T}_s], [\text{K}]$	288.1956	288.1904	288.1958	288.1913	288.1945
$\sigma[\hat{T}_s], [\text{K}]$	0.0076	0.0089	0.0081	0.0227	0.0165
<i>Low</i>					
$\mathbb{E}[\hat{T}_s], [\text{K}]$	294.0423	294.0484	294.0263	294.0178	294.0156
$\sigma[\hat{T}_s], [\text{K}]$	7.5573	7.5527	7.5695	7.5770	7.5789

Campioni	3	5	7	9	11
	~6 nm	~12 nm	~18 nm	~24 nm	~30 nm
3 finestre					
<i>High</i>					
$\mathbb{E}[\hat{T}_s], [\text{K}]$	288.1967	288.1956	288.1973	288.1960	288.1981
$\sigma[\hat{T}_s], [\text{K}]$	0.0028	0.0022	0.0021	0.0031	0.0030
<i>Middle</i>					
$\mathbb{E}[\hat{T}_s], [\text{K}]$	288.1954	288.1934	288.1954	288.1930	288.1961
$\sigma[\hat{T}_s], [\text{K}]$	0.0051	0.0063	0.0051	0.0120	0.0080
<i>Low</i>					
$\mathbb{E}[\hat{T}_s], [\text{K}]$	293.8006	293.7995	293.9850	293.7728	293.7707
$\sigma[\hat{T}_s], [\text{K}]$	7.3402	7.3410	7.4398	7.3619	7.3635
4 finestre					
<i>High</i>					
$\mathbb{E}[\hat{T}_s], [\text{K}]$	288.1958	288.1938	288.1937	288.1938	288.1963
$\sigma[\hat{T}_s], [\text{K}]$	0.0026	0.0029	0.0035	0.0039	0.0032
<i>Middle</i>					
$\mathbb{E}[\hat{T}_s], [\text{K}]$	288.1946	288.1914	288.1950	288.1884	288.1957
$\sigma[\hat{T}_s], [\text{K}]$	0.0040	0.0100	0.0114	0.0058	0.0081
<i>Low</i>					
$\mathbb{E}[\hat{T}_s], [\text{K}]$	294.2853	294.2847	294.4224	294.2645	294.2625
$\sigma[\hat{T}_s], [\text{K}]$	8.0881	8.0882	8.1048	8.1036	8.1049

**Tabella 4.3:** Analisi delle prestazioni dell'algorithmo al variare del numero e dell'estensione delle finestre atmosferiche nel caso notturno

L'affidabilità dell'algoritmo nel recupero della temperatura è abbondantemente contenuta nella distribuzione delle temperature stimate per indice di libreria. Pertanto un utile indicatore delle prestazioni dell'Extended Stepwise Refining, come di qualsiasi altro algoritmo di recupero della temperatura, è l'istogramma della distribuzione di temperature. In questo modo è possibile apprezzare in che modo sono distribuite le stime recuperate, quanto siano concentrate intorno al valor medio, quanto distinto dal valore reale, quante eventuali anomalie possano presentarsi. Ovviamente, per supportare la visualizzazione dell'istogramma con dei valori numerici, dalla distribuzione delle temperature verranno anche estratti e utilizzati i parametri sintetici quali la temperatura media e la deviazione standard.

Per quanto concerne invece l'emissività spettrale si hanno da considerare un valore di stima per lunghezza d'onda per ciascuno degli spettri utilizzati. Necessariamente, in queste condizioni, si ricorre a parametri che esprimano un'aderenza media della stima al valore reale. Nella fattispecie si è scelto di considerare l'errore quadratico medio relativo commesso nella stima. Poiché è possibile sia considerare la dipendenza dell'emissività stimata per indice di libreria che per lunghezza d'onda, è possibile ed utile considerare due errori quadratici medi, uno appunto ottenuto mediando rispetto all'indice di libreria e l'altro rispetto alla lunghezza d'onda:

$$rmse(\varepsilon)_\lambda = \sqrt{\sum_{lib=1}^{N_s} \left( \frac{\hat{\varepsilon}_{\lambda_c, lib} - \varepsilon_{\lambda_c, lib}}{\varepsilon_{\lambda_c, lib}} \right)^2} / N_s \quad (4.1)$$

$$rmse(\varepsilon)_{lib} = \sqrt{\sum_{\lambda_c=1}^{N_c} \left( \frac{\hat{\varepsilon}_{\lambda_c, lib} - \varepsilon_{\lambda_c, lib}}{\varepsilon_{\lambda_c, lib}} \right)^2} / N_c \quad (4.2)$$

Mediare rispetto all'indice di libreria significa ottenere l'errore quadratico medio relativo che l'algoritmo ESR produce per ogni lunghezza d'onda. L' $rmse(\varepsilon)_\lambda$  quindi permette di valutare la bontà della stima al variare della lunghezza d'onda, evidenziando così dove essa è più efficace e dove invece si dovessero presentare situazioni problematiche.

Contemporaneamente l' $rmse(\varepsilon)_{lib}$  consente la visualizzazione della qualità del recupero su tutta la porzione spettrale del medio infrarosso per ogni singolo spettro delle librerie considerate. In questo modo sarà possibile apprezzare per quali tipologie di spettri di emissività l'Extended Stepwise Refining produce stime accurate e quando invece fallisce nel suo intento.

Bisogna infine tener conto che se anche nominalmente il numero  $N_s$  di emissività spettrali considerate sono 102 per il gruppo *High*, 40 per quello *Middle* e 28 per quello *Low*, e che i campioni spettrali sono in totale  $N_c = 520$ , nella pratica tali valori sono leggermente inferiori, poiché laddove la trasmittanza atmosferica assorbe la totalità della radiazione non è possibile effettuare alcun recupero, e pertanto alcuni valori non possono essere considerati nella valutazione delle prestazioni medie.

# Capitolo 5

## Extended Stepwise Refining

### 5.1 Prestazioni dell'Algoritmo ESR

In seguito all'analisi preliminare sulla caratteristica di *smoothness* nel medio infrarosso, introdotti gli indici prestazionali utilizzati per analizzare le aderenze dei parametri stimati da quelli reali, si può andare a considerare l'effettiva simulazione dell'algoritmo Extended Stepwise Refining.

Il recupero dell'emissività e della temperatura tramite l'algoritmo ESR è stato simulato considerando il modello 1976 US Standard, con i medesimi parametri della precedente simulazione (Tab. 4.1) relativi a suddetto modello atmosferico. In accordo al risultato sull'analisi circa quantità ed ampiezza delle finestre spettrali ove eseguire l'algoritmo, si è scelto di applicare l'ESR in tre distinte finestre spettrali, ciascuna con un'estensione di sette campioni. Poiché i campioni distano fra loro approssimativamente 3 nm, l'ampiezza di ogni finestra spettrale è dell'ordine dei 18 nm. Le simulazioni sono state effettuate in maniera distinta per i tre gruppi di spettri di emissività, onde sottolineare la dipendenza del risultato dal valore dell'emissività media. Inoltre, ricordando la non trascurabilità della radiazione solare nel medio infrarosso, ogni simulazione è stata effettuata sia in condizioni diurne che notturne, andando cioè ad includere o meno la componente  $L_{\lambda}^{sun}$  nel termine

di radianza *Environmental*.

	$\mathbb{E}[\hat{T}_s]$ day	$\sigma(\hat{T}_s)$ day	$\mathbb{E}[\hat{T}_s]$ night	$\sigma(\hat{T}_s)$ night
<i>High</i>	288.210997 K	0.324827 K	288.197353 K	0.002122 K
<i>Middle</i>	288.039365 K	1.611879 K	288.195409 K	0.005112 K
<i>Low</i>	338.904755 K	55.433309 K	293.985021 K	7.439776 K

**Tabella 5.1:** Indici prestazionali della temperatura ricavata in condizioni diurne e notturne

Nella tabella (Tab. 5.1) sono riportati i valori delle temperature medie e la deviazione standard recuperati dall’algoritmo ESR nei tre gruppi di emissività spettrali per le condizioni diurne e notturne. Le relative distribuzioni di temperatura sono riportate nei grafici della figura (Fig. 5.1).

Una prima indicazione lampante è l’incapacità dell’Extended Stepwise Refining di recuperare dei valori affidabili di temperatura quando gli spettri considerati posseggono una emissività media molto bassa. Per quanto concerne gli spettri del gruppo *Low* si notano infatti valori di temperatura completamente errati e deviazioni standard ampissime.

Secondariamente, un’ulteriore indicazione che i valori di temperatura recuperata forniscono è la maggiore accuratezza delle stime in condizioni notturne, sia per quanto concerne il valore effettivo di temperatura media sia soprattutto per l’ampiezza della deviazione standard, che è di almeno due ordini di grandezza inferiore. Si nota inoltre che, in presenza di luce solare, gli spettri appartenenti al gruppo *Middle* permettono una stima di temperatura media dell’ordine di 1.5 K meno accurata di quella degli spettri del gruppo *High* e un peggioramento della deviazione standard dello stesso ordine, mentre in condizioni notturne si evince una maggiore robustezza alla diminuzione di emissività media poiché le variazioni di valori da un gruppo all’altro sono dell’ordine del millesimo di grado.

I risultati presentati sono teoricamente giustificabili e aspettati. Difatti, si consideri la definizione di radianza *Ground-Leaving* (2.7):

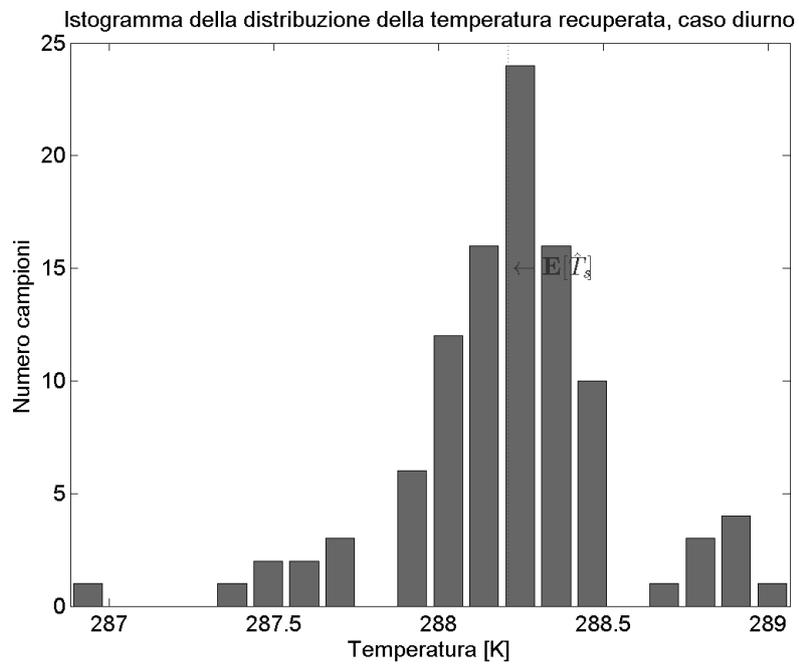
$$L_{\lambda}^{gl} = \varepsilon_{\lambda} L_{\lambda}^{bb}(T_s) + (1 - \varepsilon_{\lambda}) L_{\lambda}^{env}.$$

Si nota che quando l'emissività spettrale  $\varepsilon_{\lambda}$  assume valori mediamente inferiori a 0.2, non solo la radianza emessa  $\varepsilon_{\lambda} L_{\lambda}^{bb}(T_s)$  è molto bassa, ma al contempo la radianza *Environmental* riflessa  $(1 - \varepsilon_{\lambda}) L_{\lambda}^{env}$  assume un peso consistente poiché, per la legge di Kirchhoff (1.9), la riflettanza spettrale è complementare all'emissività e, ad una bassa emissività, corrisponde una riflettanza considerevole. Come d'altronde si era mostrato nella precedente simulazione (Fig. 4.1), la radianza *Ground-Leaving* finisce quindi per essere influenzata maggiormente da quella *Environmental* che da quella emessa, rendendo tutt'altro che affidabile il tentativo di discriminazione basato su un criterio di *smoothness*.

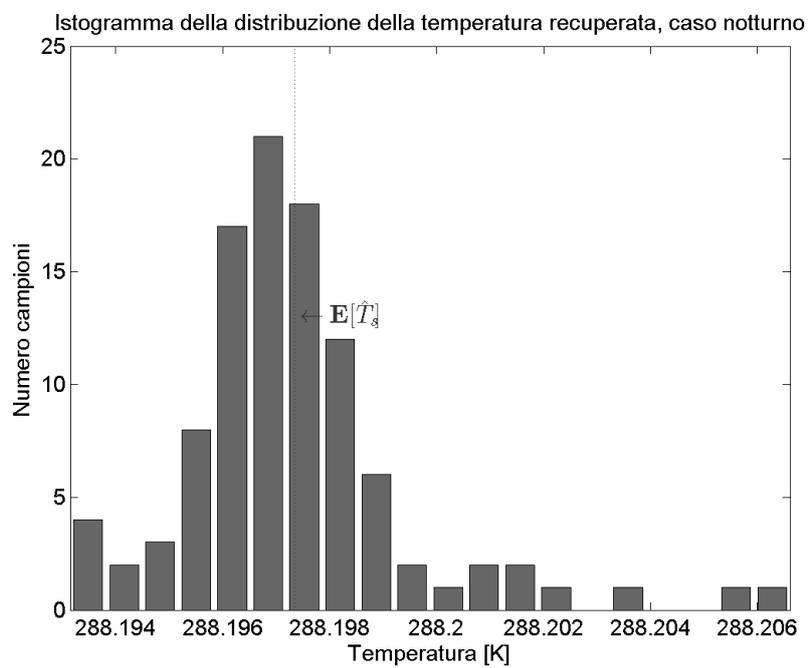
L'emissività spettrale viene ricavata invertendo il modello di trasferimento della radiazione, come indicato nella (3.3):

$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{L_{\lambda}^{gl} - L_{\lambda}^{env}}{L_{\lambda}^{bb}(T_s) - L_{\lambda}^{env}}.$$

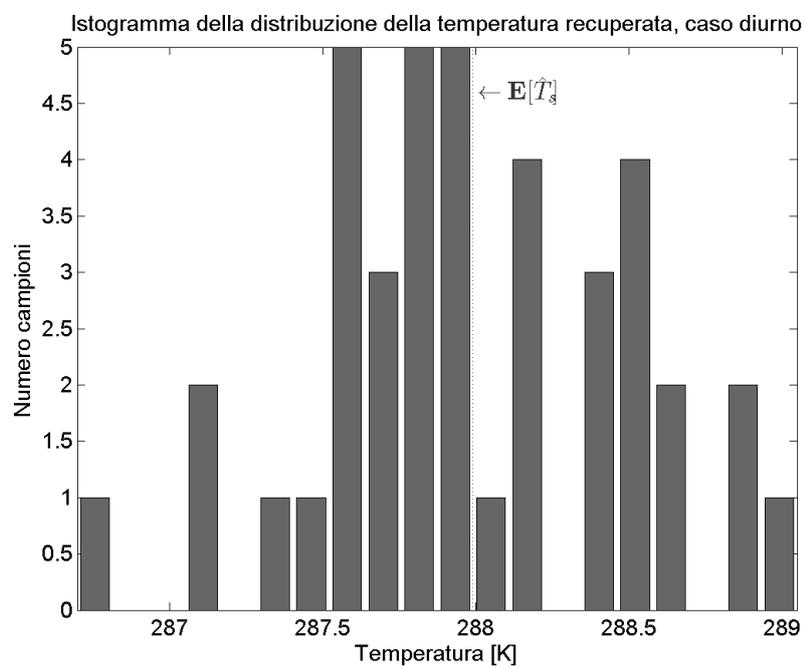
Ne discerne che la bontà della stima risulta essere strettamente legata all'accuratezza della temperatura recuperata. Si ripetono dunque le considerazioni già esplicate, le condizioni notturne sono più affidabili e gli spettri a bassa emissività media non sono recuperabili con sufficiente attendibilità. Un'informazione aggiuntiva però è fornita dall'osservazione dei risultati per medie ed alte emissività medie nel caso diurno. Dall'analisi degli errori quadratici medi si nota infatti che, anche in presenza di una stima più accurata della temperatura, alcune emissività presentano errori molto alti, ovvero alcune lunghezze d'onda risultano particolarmente problematiche nel recupero dell'emissività (Fig. 5.2 a).



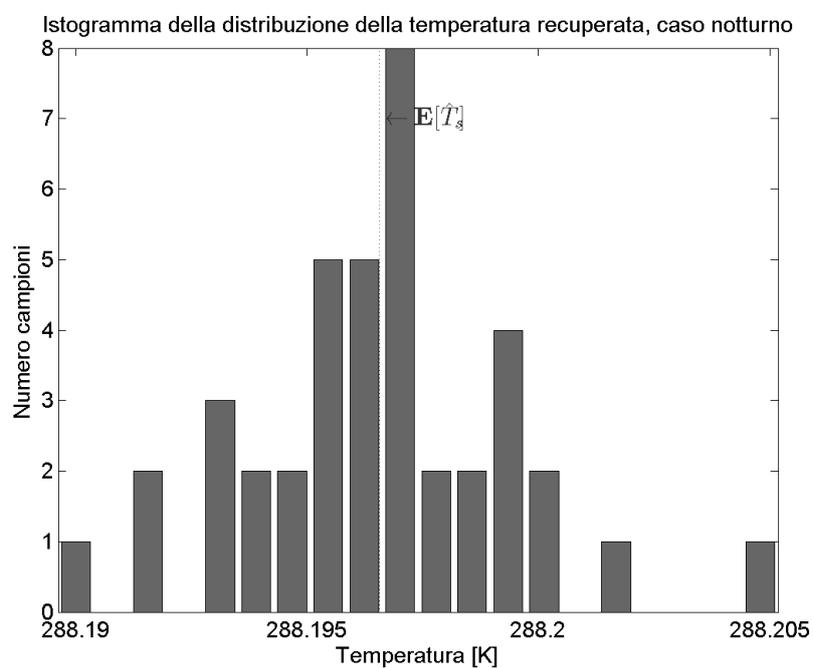
a)



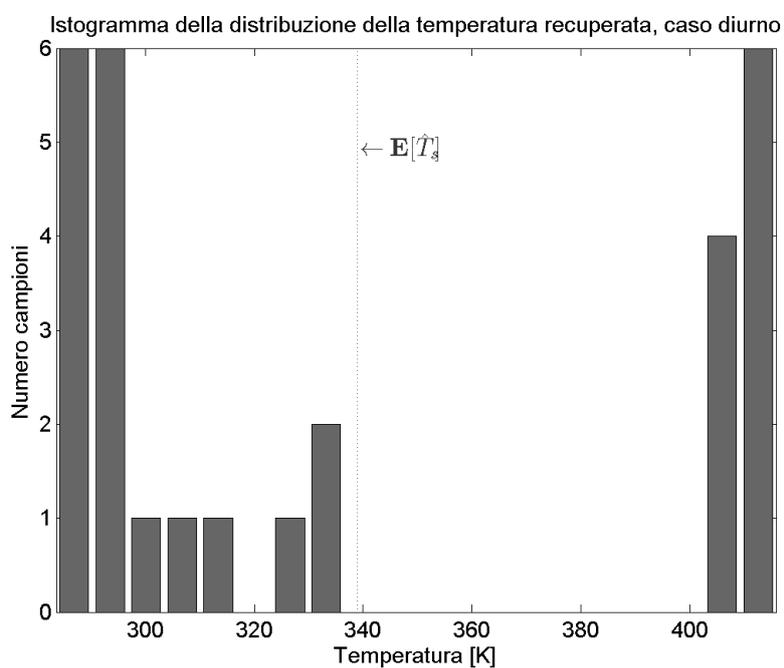
b)



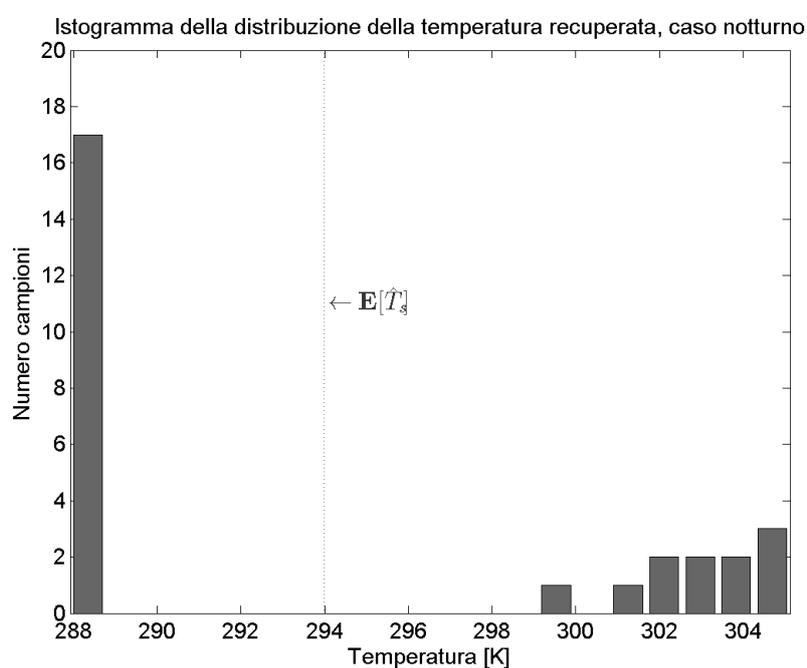
c)



d)

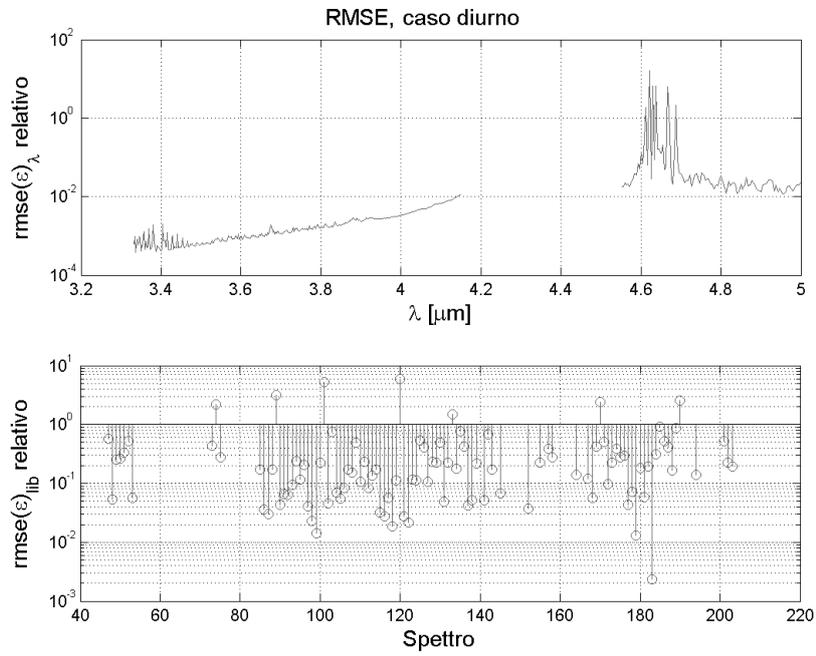


e)

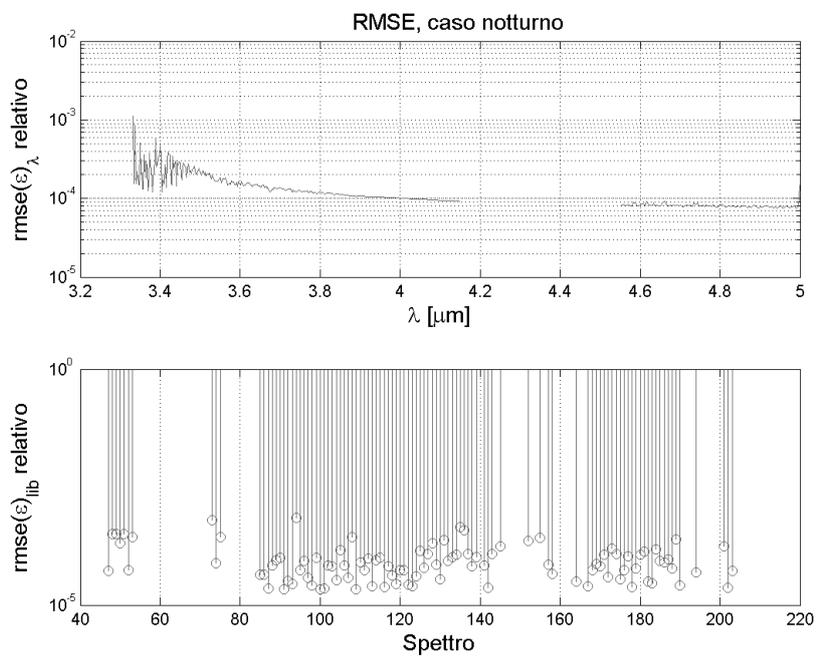


f)

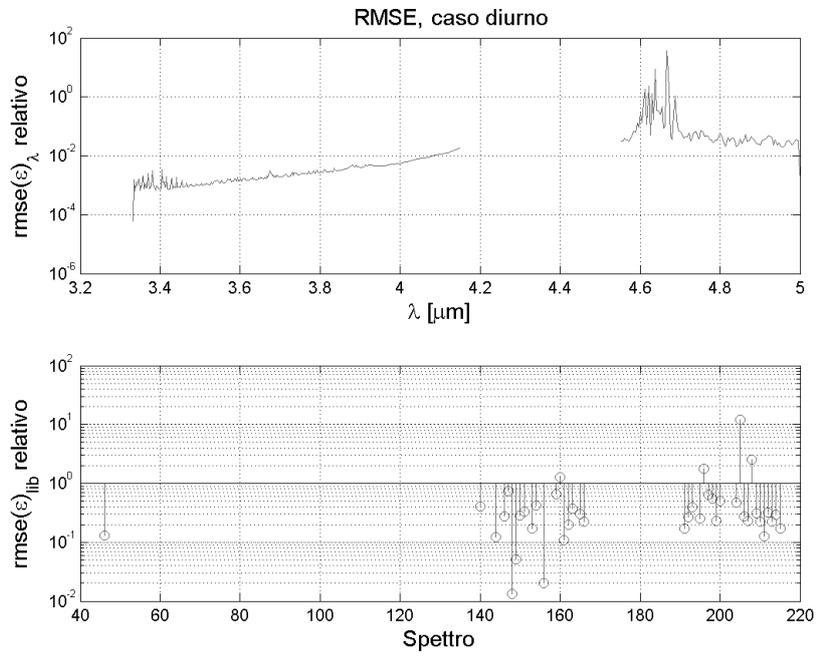
**Figura 5.1:** Istogramma della temperatura ricavata relativamente alle emissività spettrali del gruppo *High* in condizioni a) diurne e b) notturne, del gruppo *Middle* in condizioni c) diurne e d) notturne e del gruppo *Low* in condizioni e) diurne e f) notturne



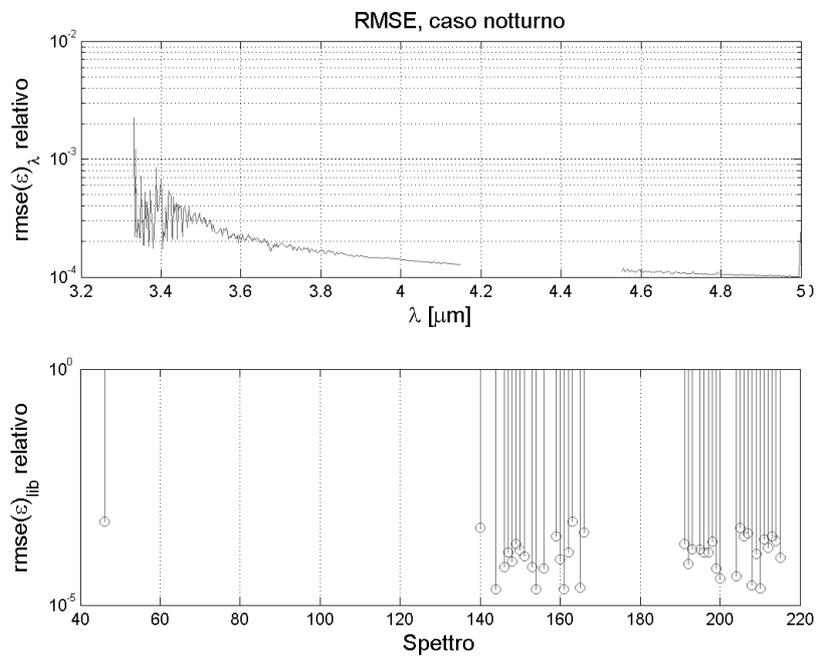
a)



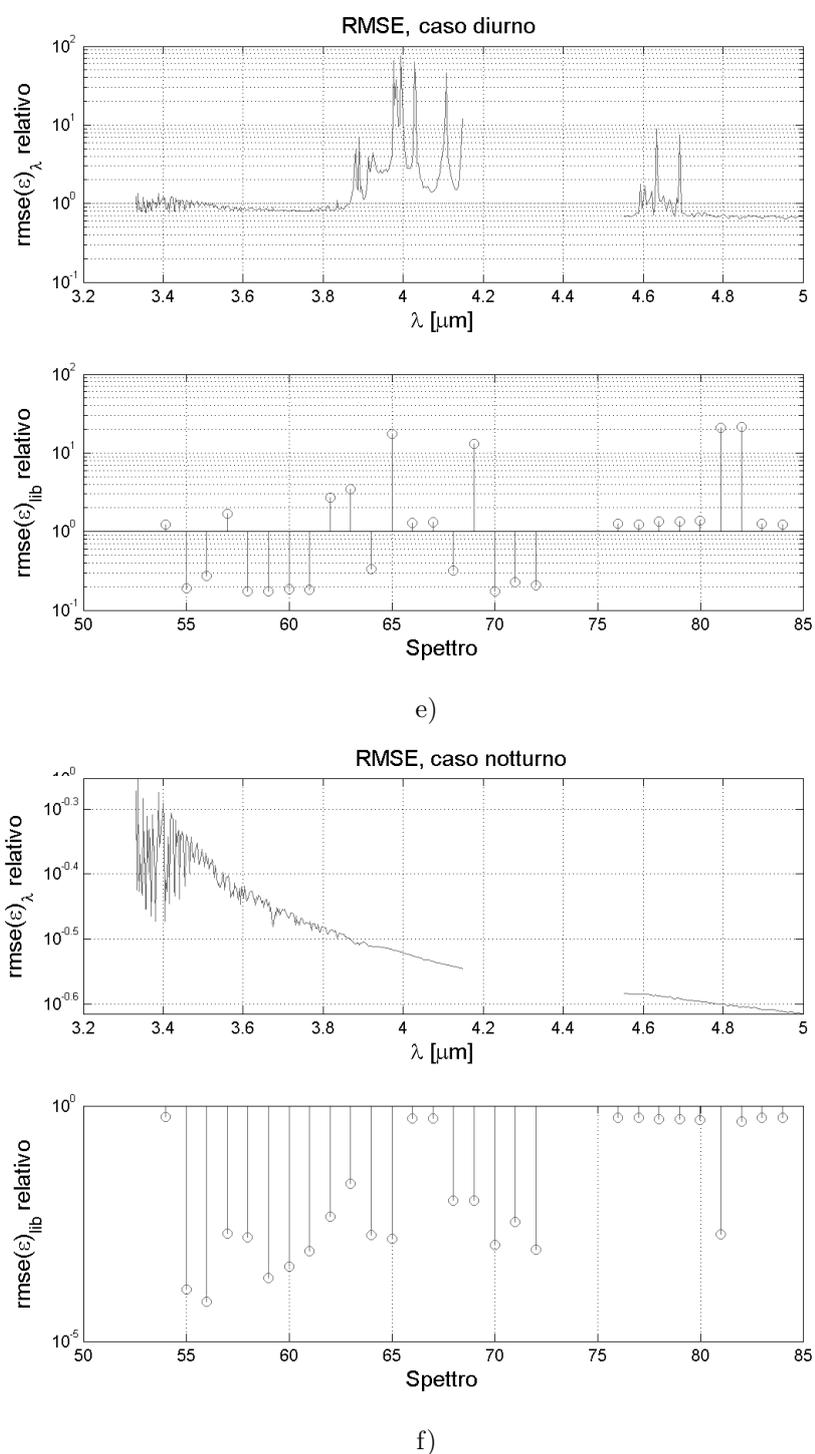
b)



c)



d)



**Figura 5.2:** Valori dell'rmse dell'emissività ricavata relativamente alle emissività spettrali del gruppo *High* in condizioni a) diurne e b) notturne, del gruppo *Middle* in condizioni c) diurne e d) notturne e del gruppo *Low* in condizioni e) diurne e f) notturne

## 5.2 Risultati delle Simulazioni

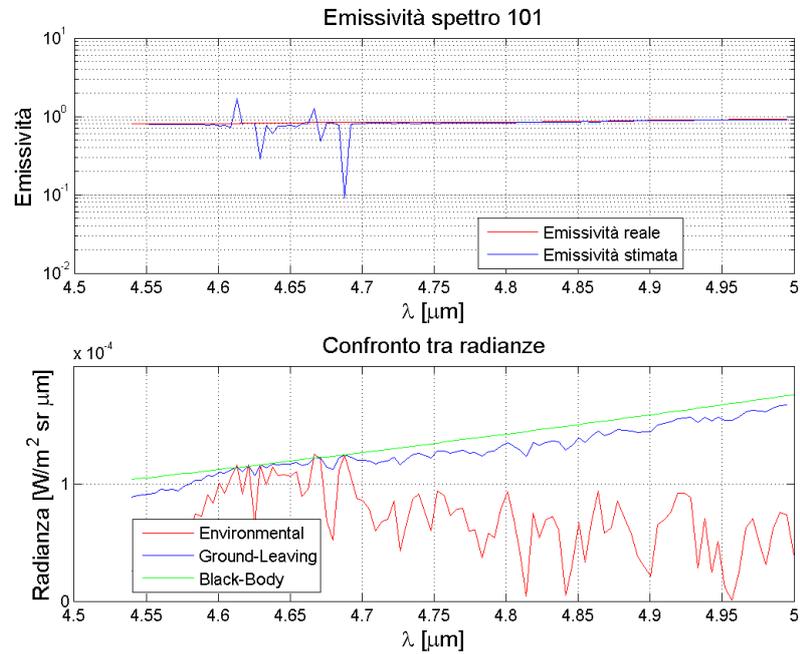
I risultati relativi alla simulazione dell'Extended Stepwise Refining impongono alcune riflessioni. Per quanto riguarda gli spettri a bassa emissività media del gruppo *Low*, si è già detto che la bassa radiazione emessa rispetto a quella *Environmental* non consente un recupero accurato della temperatura e, conseguentemente, dell'emissività. Tale problema non sussiste per le emissività spettrali con valori medi più elevati dei gruppi *Middle* e *High* per quanto concerne la stima della temperatura. Nonostante però in questo caso la temperatura sia ricavabile con una discreta accuratezza, alcuni spettri presentano errori molto marcati nel recupero dell'emissività. Si osserva che l'elevato errore quadratico medio è causato da errori locali, concentrati in determinate lunghezze d'onda, nella zona spettrale tra i 4.6 e i 4.7  $\mu\text{m}$ . Andando ad evidenziare il comportamento di una delle emissività problematiche, quale lo spettro 101 della libreria ASTER, nella zona spettrale di interesse, e confrontandolo con gli andamenti delle radianze che concorrono nel recupero della stessa, è possibile trovare una giustificazione teorica ai pesanti errori riscontrati.

Si consideri nuovamente l'inversione del modello di trasferimento della radiazione necessaria per ottenere il valore dell'emissività, ovvero la (3.3):

$$\varepsilon_\lambda = \frac{L_\lambda^{gl} - L_\lambda^{env}}{L_\lambda^{bb}(T_s) - L_\lambda^{env}}.$$

Si osserva che il recupero dell'emissività dipende dalla conoscenza delle radianze  $L_\lambda^{gl}$ ,  $L_\lambda^{env}$  e  $L_\lambda^{bb}(T_s)$ , le quali assumono valori molto simili, persino coincidenti (Fig. 5.3). In queste condizioni, per queste determinate lunghezze d'onda problematiche, la (3.3) diventa altamente instabile, rasentando la situazione di indeterminazione 0/0.

La domanda alla quale si è cercato di dare una risposta è quanto gli errori dovuti a questa instabilità dovuta all'inversione del modello di trasferimento

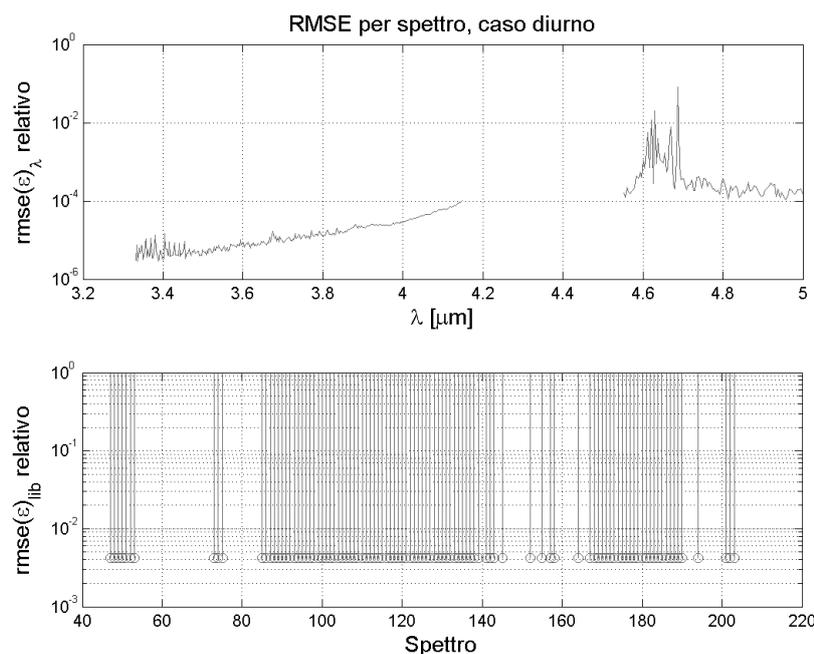


**Figura 5.3:** Confronto tra emissività e radianze nello spettro ASTER 101

della radiazione siano insiti nel modello stesso e quanto invece dipendano dall'accuratezza della temperatura stimata.

Il recupero della temperatura viene effettuato dall'algoritmo in base all'emissività spettrale ricavata nelle finestre spettrali a massima radiazione *Environmental*. L'emissività totale viene a sua volta stimata a partire dal valore di temperatura precedentemente ricavato. Si stima dunque l'emissività nelle finestre selezionate, dalla quale si ricava la temperatura che viene utilizzata per recuperare l'emissività su tutto lo spettro. Nonostante questa concatenazione delle stime, appare evidente che la temperatura, considerandola limitatamente agli spettri dei gruppi *High* e *Middle*, viene recuperata con un errore relativamente basso, mentre gli errori quadratici medi sull'emissività presentano valori consistenti. Si è pensato allora di scindere le due stime, rimuovendo il recupero dell'emissività spettrale dalla dipendenza intrinseca con il recupero della temperatura. Si è cioè supposto di conoscere la temperatura reale, e, a partire da questa, recuperare l'emissività. Operando

in questo modo, è possibile esaminare esclusivamente il funzionamento dell'inversione del modello di trasferimento della radiazione, e di conseguenza isolare la fonte degli errori nel recupero dell'emissività spettrale.



**Figura 5.4:** Valori dell'rmse dell'emissività con temperatura reale

I risultati ottenuti sono piuttosto eloquenti (Fig. 5.4). L'errore quadratico medio relativo per indice di libreria dimostra chiaramente che, in presenza della temperatura reale, scompaiono gli spettri problematici, quali l'ASTER 101, e che i valori si mantengono al di sotto dell'un per cento, restituendo un'apprezzabilissima stima dell'emissività spettrale. Per quanto riguarda invece l'errore quadratico medio relativo rispetto alla lunghezza d'onda, ancora si può notare che per onde corte ( $3.3 \div 4.15 \mu\text{m}$  circa) esso si mantiene al di sotto di  $10^{-4}$ , mentre per onde più lunghe l'errore è più consistente e nuovamente presenta grossa instabilità intorno a  $4.6 \div 4.7 \mu\text{m}$ . Comunque, anche i valori peggiori arrivano al più intorno al 10%.

Si può affermare in conclusione che l'errore riportato nella stima dell'emissività spettrale è causato dall'errore nel recupero della temperatura. Nonostante la temperatura sia stimata con una approssimazione soddisfacente, l'inversione del modello di trasferimento della radiazione è altamente instabile nella zona spettrale compresa tra i 4.6 e i 4.7  $\mu\text{m}$ , e le seppur lievi fluttuazioni della temperatura stimata rispetto al valore reale vengono ampiamente amplificate, ripercuotendosi in maniera molto dannosa nel recupero dell'emissività.

### 5.3 Analisi delle Condizioni di Malfunzionamento

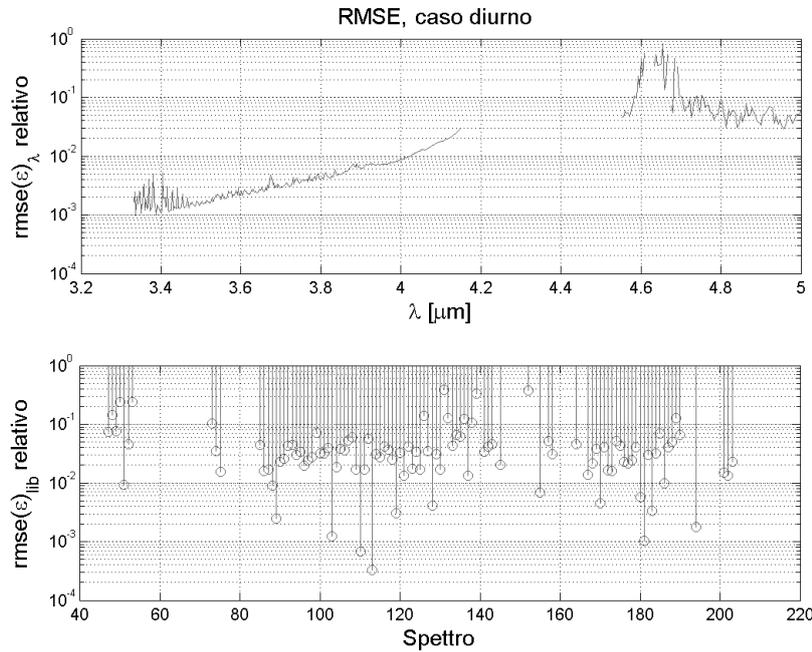
Le deduzioni sulle cause degli errori nella zona spettrale problematica tra i 4.6 e i 4.7  $\mu\text{m}$  sono ulteriormente validate dalla simulazione successivamente effettuata. Si è cioè maggiormente sottolineato il legame tra le lunghezze d'onda dove si presentano gli errori nel recupero dell'emissività spettrale e le similitudini tra i valori delle radianze *Ground-Levaing*, *Environmental* e di corpo nero in corrispondenza di suddette lunghezze d'onda. Per la seguente simulazione si è infatti introdotta una lieve modifica nell'algoritmo ESR, atta a cancellare il recupero dell'emissività qualora non fosse soddisfatta una particolare condizione. Tale condizione ha lo scopo di considerare non valida l'emissività recuperata quando i valori delle tre radianze che compaiono nel modello di trasferimento della radiazione sono troppo simili tra loro, rendendo instabile il modello. Per realizzare ciò, si sono costruite due variabili di controllo ausiliari che corrispondono alla normalizzazione del numeratore e del denominatore del modello di trasferimento della radiazione rispetto alla somma dei contributi di radianza che li compongono.

$$ctrl1 = \frac{L_{\lambda}^{gl} - L_{\lambda}^{env}}{L_{\lambda}^{gl} + L_{\lambda}^{env}};$$

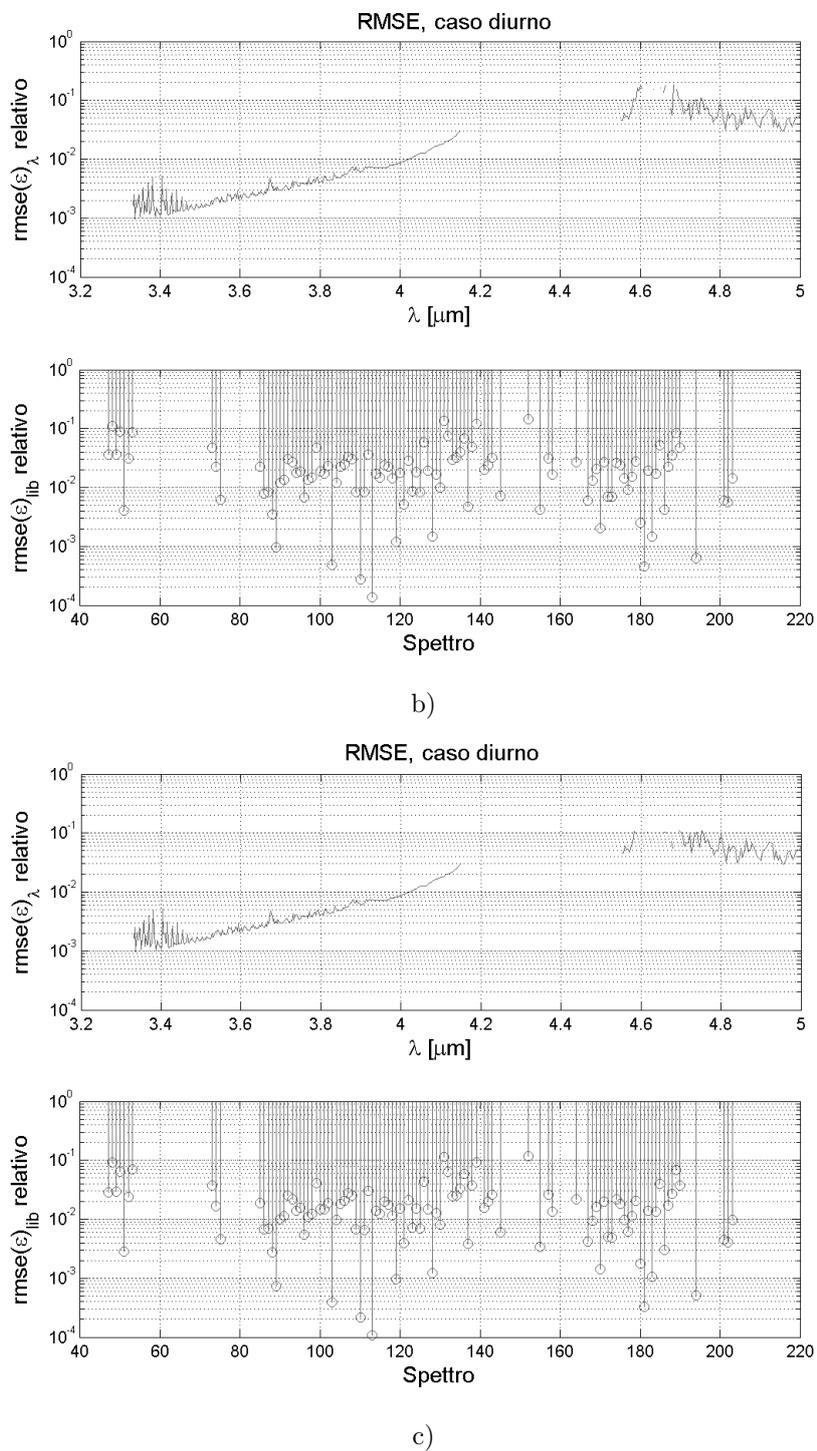
$$ctrl2 = \frac{L_{\lambda}^{bb}(T_s) - L_{\lambda}^{env}}{L_{\lambda}^{bb}(T_s) + L_{\lambda}^{env}}.$$

Il controllo sull'affidabilità della stabilità del modello avviene confrontando tali variabili con una soglia prefissata. Quando tali variabili appaiono inferiori alla soglia, il recupero dell'emissività per tale lunghezza d'onda viene considerato non accettabile, e la stima viene scartata.

I risultati mostrano che effettivamente le lunghezze d'onda che vengono cancellate sono quelle problematiche (Fig. 5.5). Si può inoltre osservare come, anche aumentando la soglia, la zona spettrale tra 4.6 e 4.7  $\mu\text{m}$  sia letteralmente cimata dalla modifica introdotta. La cancellazione di questi recuperi di emissività non affidabili portano ad abbassare nettamente l'errore quadratico medio, dimostrando ancora una volta che gli errori di stima i sono introdotti dall'instabilità dell'RTM.



a)



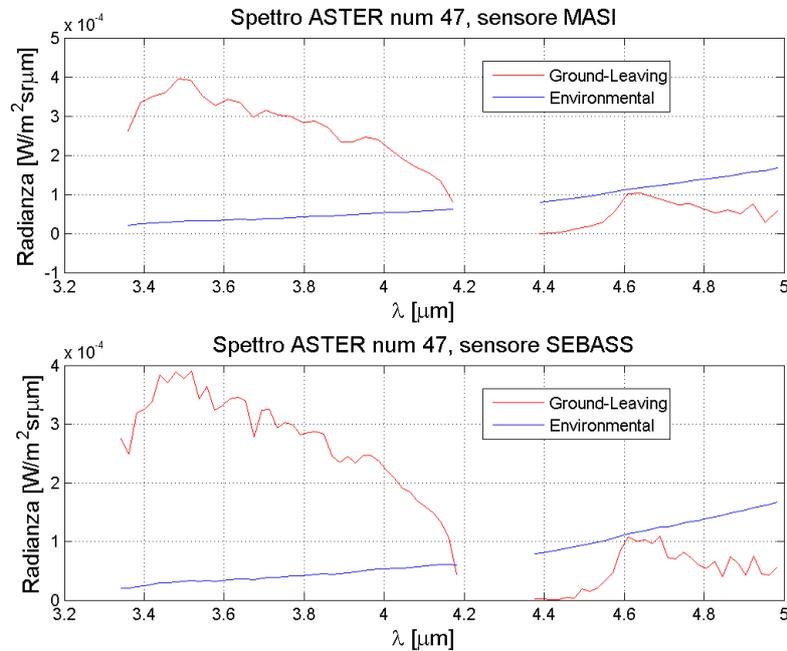
**Figura 5.5:** Valori dell'rmse dell'emissività con controllo sull'RTM al variare della soglia a) 0.01, b) 0.05, c) 0.1

# Capitolo 6

## Simulazione dei Dati per Sensori Reali

### 6.1 ESR per MASI e SEBASS

Le simulazioni descritte nei precedenti capitoli sono state effettuate considerando la massima risoluzione spettrale disponibile negli spettri di emissività delle librerie ASTER e MODIS. Nella regione del medio infrarosso compresa tra 3.3 e 5.0  $\mu\text{m}$ , le emissività di prova utilizzate dispongono di 520 campioni, che corrispondono, come si è già diffusamente detto, ad una risoluzione spettrale di circa 3 nm. Al fine di estendere il metodo *Stepwise Refining* nel MIR, si è inoltre verificato che le condizioni ottimali di utilizzo necessitano l'applicazione dell'algoritmo in finestre atmosferiche contenenti sette campioni, ovvero 18 nm circa di estensione. Attualmente i dati iperspettrali ottenibili dai sensori esistenti non raggiungono mai un tale livello di risoluzione spettrale, il numero di canali disponibili nel medio infrarosso è molto inferiore e pertanto ci si aspetta una deteriorazione delle prestazioni nell'impiego dell'ESR, in quanto una risoluzione spettrale più elevata può non essere adeguata per apprezzare la differenza di *smoothness* tra le radianze *Ground-Leaving* ed *Environmental*. L'algoritmo SR, relativamente all'infrarosso termico, si è già dimostrato poco robusto alla degradazione della risoluzione spettrale [14]. Si è voluto dunque quantificare la perdita di affidabilità anche nel MIR, simulando i dati ottenibili da sensori reali.



**Figura 6.1:** Radianze *Ground-Leaving* ed *Environmental* per risoluzioni spettrali relative ai sensori MASI e SEBASS

Tra i sensori più recenti che dispongono di canali di osservazioni iperspettrali anche nella regione del medio infrarosso vi sono il SEBASS e il MASI 600, dei quali una più accurata descrizione è fornita nel seguito (App. C). Le risoluzioni spettrali di questi sensori sono di un ordine di grandezza superiori a quelle utilizzate precedentemente. Ciò si riflette nella proprietà di *smoothness*, le radianze *Ground-Leaving* ed *Environmental* appaiono meno facilmente discriminabili, come si evince confrontando i loro andamenti. In figura (Fig. 6.1) sono mostrati i confronti tra le radianze relative a simulazioni di dati MASI 600 e SEBASS per quanto riguarda lo spettro numero 47 della libreria ASTER. Se paragonati con l'analogia figura (Fig. 4.1) relativa alla simulazione con risoluzione di 3 nm, si nota come la degradazione spettrale influisca sulla proprietà di *smoothness*, e sulla conseguente possibilità di discernere le due radianze.

Al fine di simulare i dati ottenibili dai sensori sopracitati, in mancanza di ulteriori informazioni, si è supposto che le curve di risposta spettrale abbiano un andamento di tipo gaussiano. La deviazione standard di ciascuna gaussiana è scelta in modo che valga la seguente relazione con la larghezza a metà ampiezza *fwhm*:

$$\sigma_j = \frac{fwhm}{2\sqrt{2\ln(2)}}.$$

Per ogni canale  $\lambda_j$  dei sensori si pesano dunque i valori di radianza con le curve gaussiane  $\mathcal{N}(\lambda_j, \sigma_j)$ , simulando dunque il valore di radianza misurabile dai sensori SEBASS e MASI 600:

$$L_{\lambda_j}^{sens} = \frac{\int L_{\lambda}^{gl} \mathcal{N}(\lambda_j, \sigma_j) d\lambda}{\int \mathcal{N}(\lambda_j, \sigma_j) d\lambda} \approx \frac{\sum_{j=0}^{N_c-1} L_{\lambda}^{gl} \mathcal{N}(\lambda_j, \sigma_j) \Delta\lambda_j}{\sum_{j=0}^{N_c-1} \mathcal{N}(\lambda_j, \sigma_j) \Delta\lambda_j}. \quad (6.1)$$

Partendo dalla radianza misurata al sensore e degradando le radianze *Environmental* ed emessa in base al nuovo riferimento delle lunghezze d'onda, si è applicato l'algoritmo Extended Stepwise Refining esclusivamente al caso migliore, ossia per gli spettri con alta emissività media (gruppo *High*). Al fine di ottimizzare l'algoritmo alla nuova tipologia di dati, occorre però apportare una modifica. Per dati con risoluzione di circa 3 nm le condizioni ottimali di funzionamento prevedono l'impiego di tre finestre atmosferiche, ciascuna contenente sette campioni, per un'estensione quindi di 18 nm per finestra. Le distanze tra i campioni relativi ai canali SEBASS e MASI 600 sono superiori ai 3 nm utilizzati sino ad ora, e corrispondono rispettivamente a 20 e a 32 nm. L'impossibilità di ottenere finestre di 18 nm costringe ad un adattamento dell'algoritmo al fine di avere finestre atmosferiche il più possibile prossime a tale valore. Ne consegue che non saranno più considerati sette campioni bensì tre per finestra, che garantiscono la minima ampiezza e possibile e quindi la più vicina ai 18 nm ottimali. In particolare si avranno finestre quindi di 50 e 64 nm di ampiezza rispettivamente per il sensore SEBASS e per quello MASI 600.

I valori delle temperature ricavate implementando l'algoritmo Extended Stepwise Refining per dati che simulano quelli ottenibili tramite sensori MASI

600 e SEBASS sono riportati nella seguente tabella (Tab. 6.1):

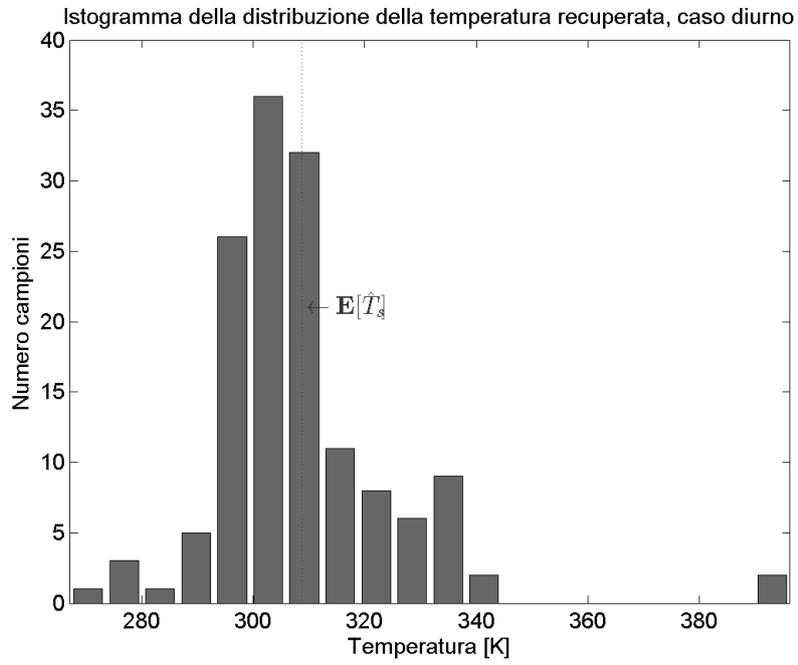
	$\mathbb{E}[\hat{T}_s]$ day	$\sigma(\hat{T}_s)$ day	$\mathbb{E}[\hat{T}_s]$ night	$\sigma(\hat{T}_s)$ night
MASI	308.720841 K	16.849296 K	288.131300 K	3.090861 K
SEBASS	298.053261 K	17.920250 K	288.350581 K	3.045057 K

**Tabella 6.1:** Indici prestazionali della temperatura ricavata in condizioni diurne e notturne

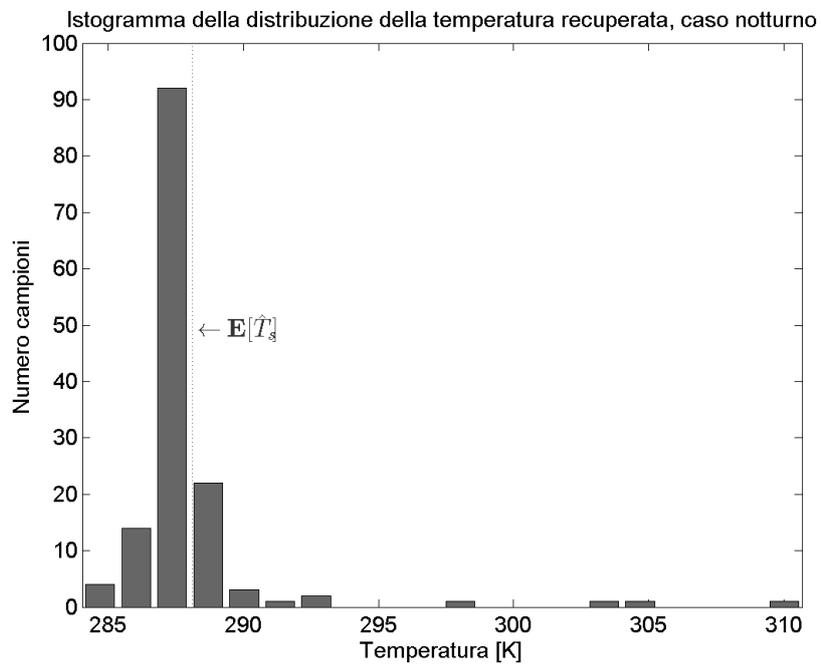
In figura (Fig. 6.2) sono invece rappresentate le distribuzioni di temperatura ricavate dalle simulazioni.

In assenza di luce solare, per entrambi i sensori, l'algoritmo riesce ad individuare la temperatura media con un'approssimazione dell'ordine del decimo di grado, tuttavia la deviazione standard di circa 3 K costituisce un'incertezza piuttosto elevata. In condizioni diurne invece l'algoritmo è totalmente inefficiente. Il sensore SEBASS, che dispone di un numero più elevato di campioni, fornisce una stima media con un errore di 10 K, con una deviazione standard di poco inferiore ai 20 K. Per quanto concerne i risultati per il sensore MASI 600, l'incertezza sulla temperatura assume valori simili a quelli del caso SEBASS, mentre peggiora il dato riguardo la temperatura media ricavata che è sovrastimata di 20 K.

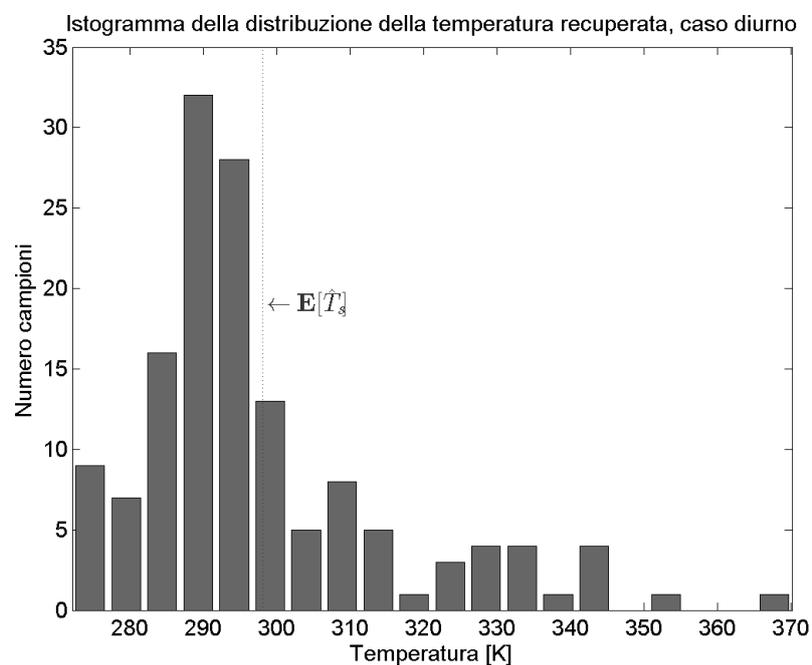
L'emissività spettrale (Fig. 6.3) risente ovviamente dell'enorme errore sulla stima della temperatura nel caso diurno. L'inversione del modello di trasferimento della radiazione infatti trasmette tale consistente errore nel recupero dell'emissività, che risulta anch'essa estremamente inaffidabile. Entrambi i casi per sensori MASI 600 e SEBASS infatti presentano un errore che si mantiene superiore al 10% ma raggiungendo anche picchi di tre ordini di grandezza superiori. Se si esclude infatti una prima regione spettrale tra i 3.3 fino ai 3.8  $\mu\text{m}$ , l'errore quadratico medio relativo per lunghezza d'onda è quasi stabilmente superiore all'unità. Così come si nota che, tranne che per qualche spettro particolarmente favorevole (ossia maggiormente *smooth* e con emissività elevata), anche l'errore quadratico medio relativo per indice



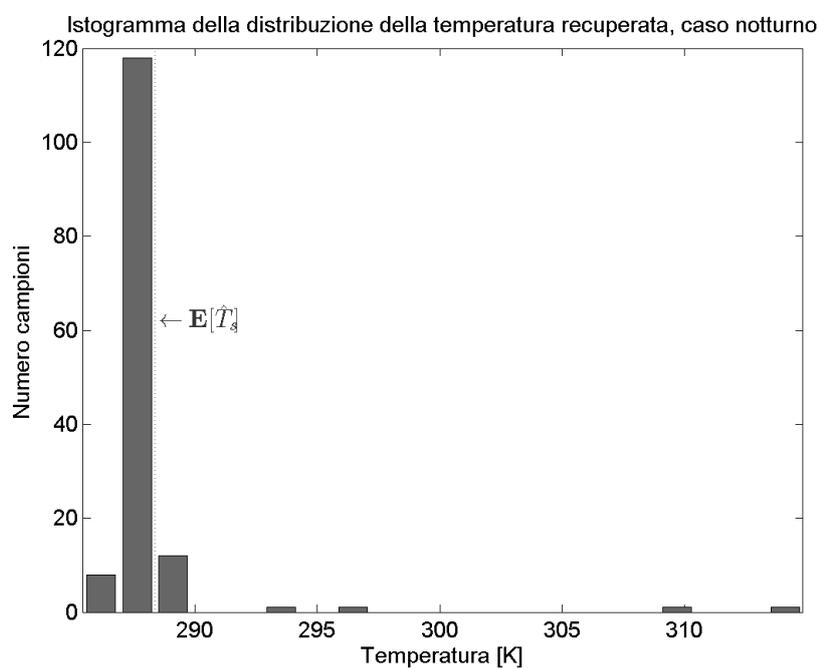
a)



b)

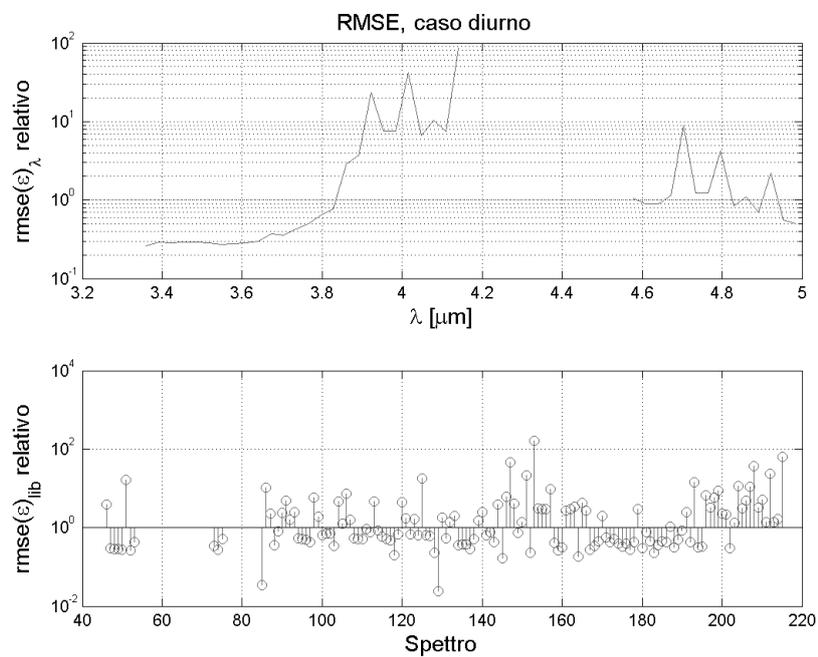


c)

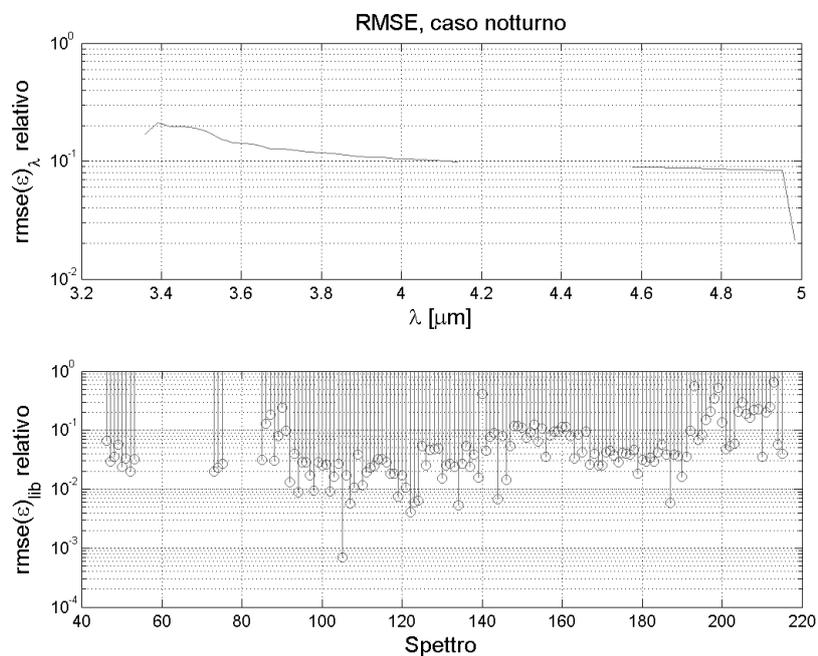


d)

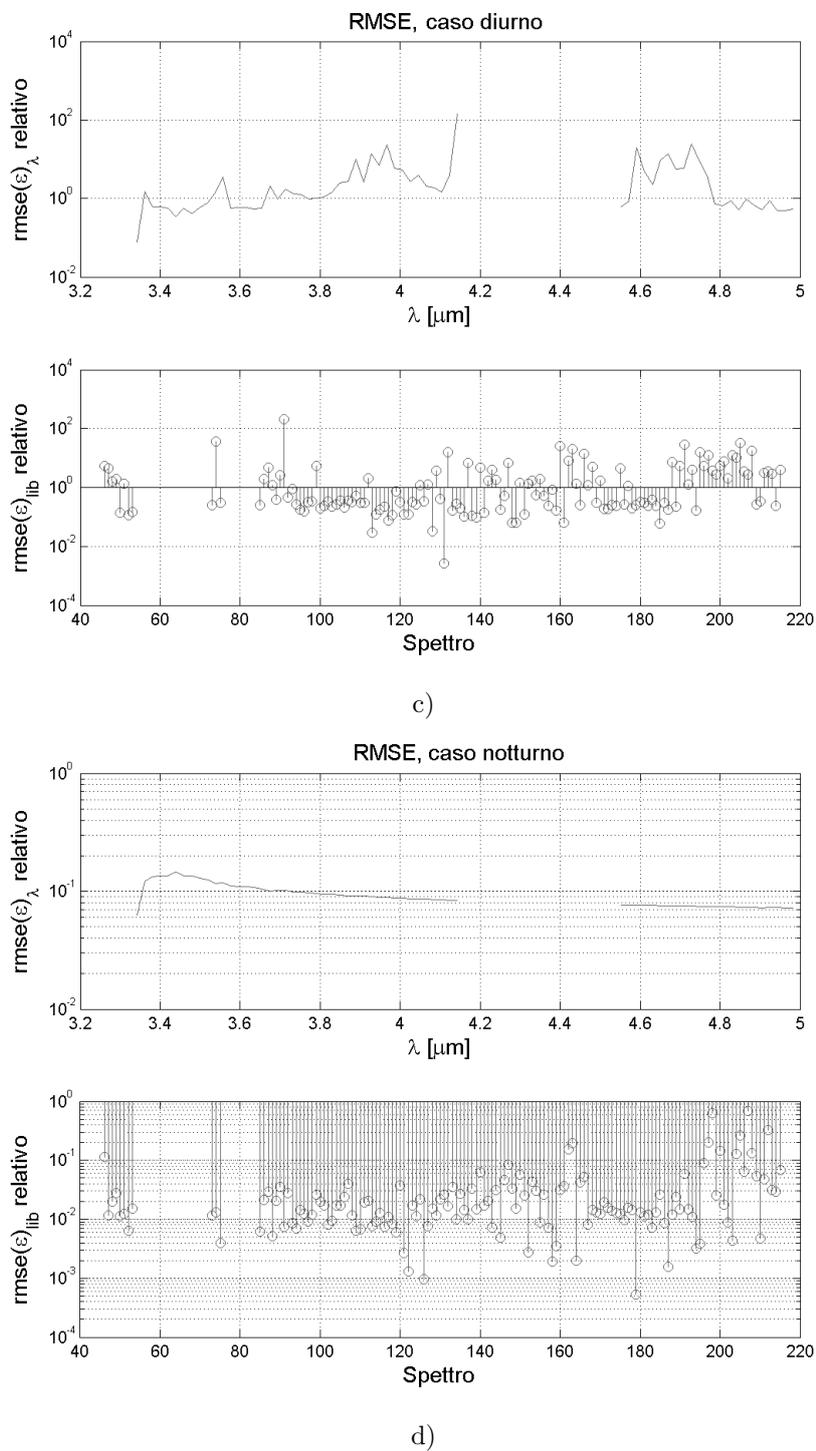
**Figura 6.2:** Istogramma delle temperature ricavate per sensori MASI in condizioni a) diurne e b) notturne e per sensori SEBASS in condizioni c) diurne e d) notturne



a)



b)



**Figura 6.3:** Prestazione dell'ESR con degradazione dei dati in accordo alle specifiche MASI a),b),c) e d) e SEBASS e), f), g) e h)

di libreria è quasi ovunque superiore al 10%.

In caso di misurazioni notturne invece l'emissività spettrale è ricavabile in maniera molto più affidabile, dal momento che la temperatura recuperata è essa stessa stimabile con maggiore precisione. A differenza del caso diurno, la zona più problematica in assenza di radiazione solare è quella a lunghezze d'onda più corte. I peggiori recuperi riguardano quella zona spettrale in cui si va incontro ad errori relativi anche superiori al 10%. Per altre lunghezze d'onda la stima produce un errore quadratico medio relativo inferiore ma sempre intorno all'ordine del 10%. Per quanto concerne l'errore valutato per indice di libreria, si nota che, sebbene alcuni spettri in particolare siano recuperati con minore efficienza (ovvero gli spettri che corrispondono ai valori meno precisi di temperatura stimata), per la maggioranza degli spettri l'errore è inferiore alla soglia del 10%, e che in nessun caso si supera un errore relativo dell'100%.

## 6.2 Inversione dell'RTM per MASI e SEBASS

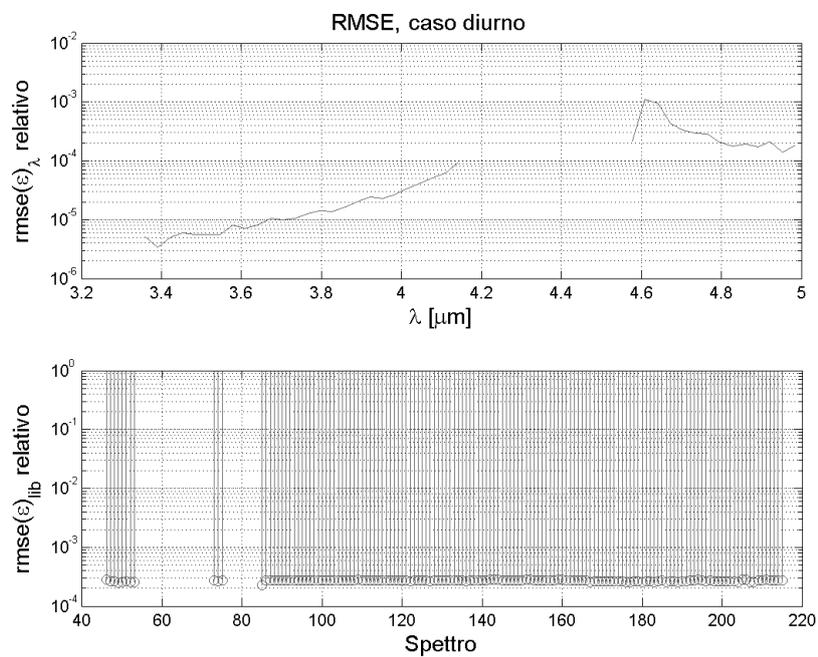
Nel precedente paragrafo si è dunque giunti alla conclusione che, limitatamente a misurazioni in condizioni diurne, l'algoritmo Extended Stepwise Refining, in presenza di dati reali, non è in grado di fornire una stima soddisfacente della temperatura, né tantomeno, di conseguenza, dell'emissività spettrale. In condizioni notturne invece il peggioramento delle prestazioni è limitato ma il risultato rimane comunque non del tutto affidabile, l'errore sulla temperatura è dell'ordine del decimo di grado ma la deviazione standard superiore ai tre gradi indica che per alcuni spettri si fallisce nel recuperare un valore attendibile. Per questi spettri, in corrispondenza quindi di errori più consistenti sulle temperature recuperate, anche l'emissività superficiale non viene stimata con sufficiente precisione. Se ne conclude che, allo stato attuale dei moderni sensori, non è possibile utilizzare l'Extended Stepwise Refining in maniera soddisfacente, poiché anche in assenza di radiazione solare non è

garantita una sufficiente accuratezza del recupero.

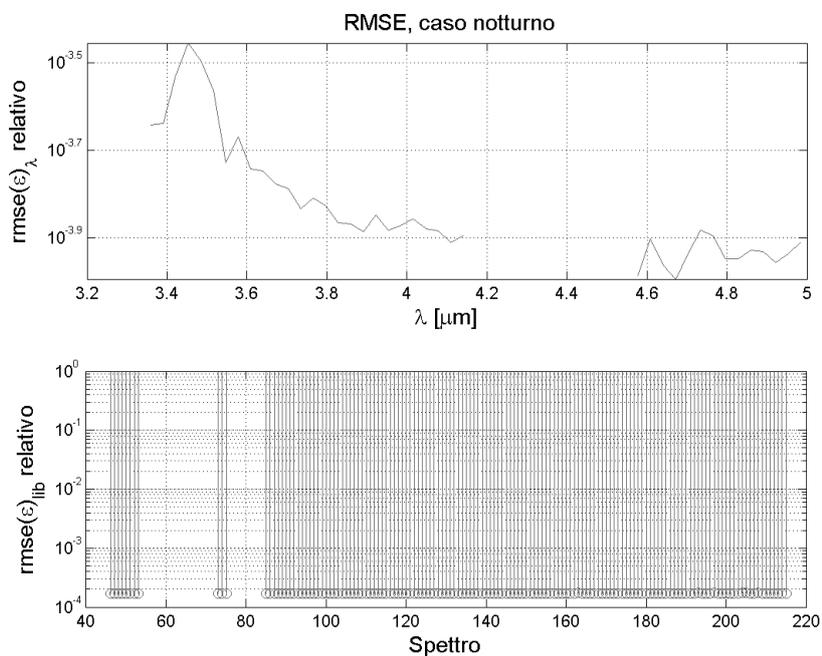
Una possibile alternativa, ovvero un metodo per cercare di risolvere il problema della separazione della temperatura e dell'emissività nel medio infrarosso, consiste nel supporre di poter disporre di un valore di temperatura superficiale. Ciò comporta la riduzione del numero di incognite da determinare, per cui, per ciascun canale spettrale, ad ogni misurazione corrisponderà il recupero di un valore di emissività. Tale ipotesi è giustificata dalla maggiore accuratezza nel recupero della temperatura nella zona dell'infrarosso termico [14]. Sia quindi disponibile un dato di osservazione non solo relativamente al medio infrarosso ma anche al termico. In questa regione è possibile applicare gli algoritmi di recupero quali lo stesso SR e quelli presentati precedentemente (Cap. 3.1) al fine di estrapolare un dato affidabile di temperatura. Utilizzando tale valore nel medio infrarosso, per conoscere l'emissività si dovrà ricorrere ad una mera inversione del modello di trasferimento della radiazione (3.3). L'utilizzo di un dato di temperatura proveniente dal termico sostituisce di fatto l'applicazione dell'algoritmo ESR, limitandosi dunque al solo recupero dell'emissività.

Se la temperatura è stimata perfettamente, ovverosia se essa è nota, i risultati ottenuti con questo approccio sono ottimi, sia per sensori MASI 600 che per sensori SEBASS (Fig. 6.4). Analogamente a quanto visto precedentemente nelle simulazioni a risoluzione piena (Cap 5.2), l'emissività spettrale presenta zone instabili nella medesima banda tra i 4.6 e i 4.7  $\mu\text{m}$ , ciononostante le prestazioni sono comunque molto buone. Se ne deduce dunque che l'inversione del modello di trasferimento della radiazione, pur presentando una delicata instabilità, è uno strumento affidabile per recuperare l'emissività spettrale, a patto di conoscere perfettamente la temperatura.

In base alle prestazioni raggiungibili dai principali algoritmi di separazione nell'infrarosso termico [14] per quanto concerne la precisione nella stima della temperatura, si è allora proceduto a perturbare il valore di temperatura rispetto a quello reale, per indagare quanto l'inversione del modello di tra-



a)



b)

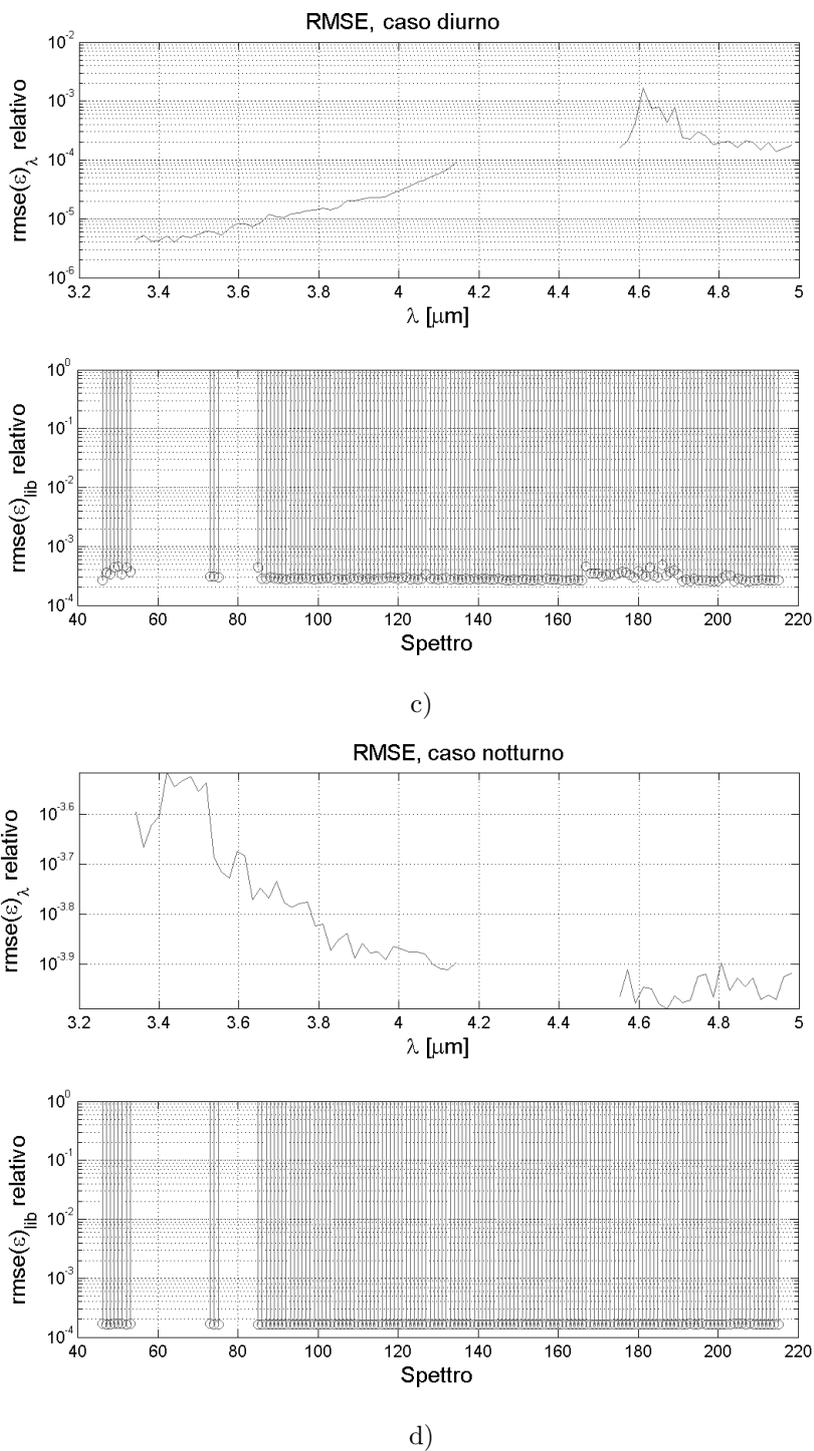


Figura 6.4: Prestazioni dell'inversione dell'RTM per dati MASI a) e b) e per dati SEBASS c) e d) con temperatura nota

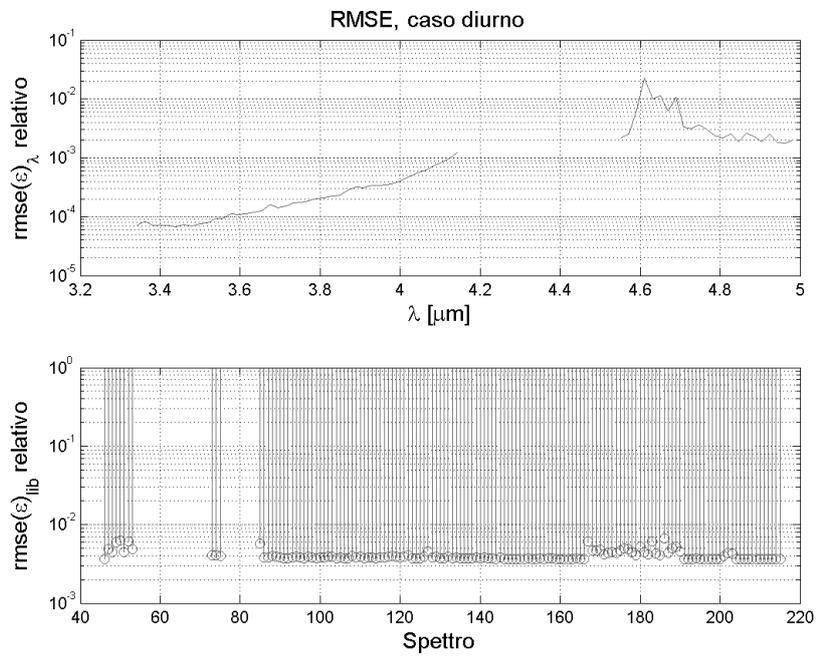
sferimento della radiazione fornisca prestazioni ancora affidabili, quanto cioè esso sia robusto all'errore sulla temperatura in caso di risoluzioni di sensori reali.

La deviazione standard che l'algoritmo Stepwise Refining presenta nell'infrarosso termico è pari a 0.014 K, pertanto, come prima prova, la temperatura reale è stata alterata di tre volte tale quantità:  $\pm 3 \cdot 0.014 = \pm 0.042$ . In entrambi i casi di perturbazione per eccesso e per difetto, l'errore quadratico medio relativo risulta mantenersi abbondantemente al di sotto di  $10^{-2}$  per quasi tutta la porzione di spettro del medio infrarosso, eccezion fatta per le solite lunghezze d'onda problematiche, dove comunque non si commette mai errore relativo superiore al 10%.

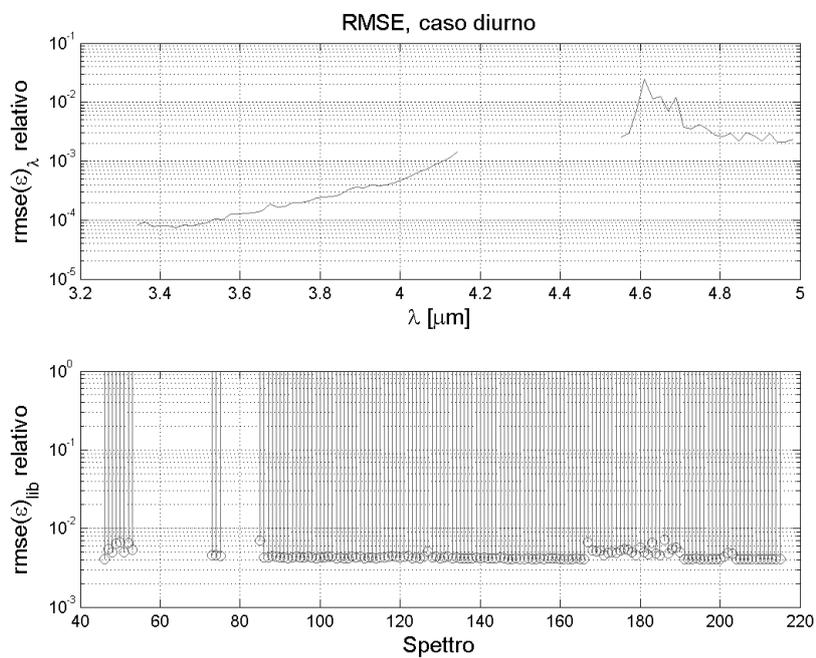
Procedendo ad introdurre errori sempre crescenti nella temperatura di riferimento utilizzata per recuperare l'emissività spettrale tramite l'inversione del modello di trasferimento della radiazione, i risultati continuano ad essere ottimi. Si osserva che per superare la soglia del 10% è necessario arrivare ad introdurre errori nelle temperature di riferimento di quasi mezzo grado. Perturbando ulteriormente la temperatura e arrivando a 1.6 K di errore nella stima, nuovamente le punte massime non superano mai il  $10^{-1}$ .

I risultati di questa serie di simulazioni, relativamente al caso diurno per sensore MASI 600, sono mostrati in figura (Fig. 6.5).

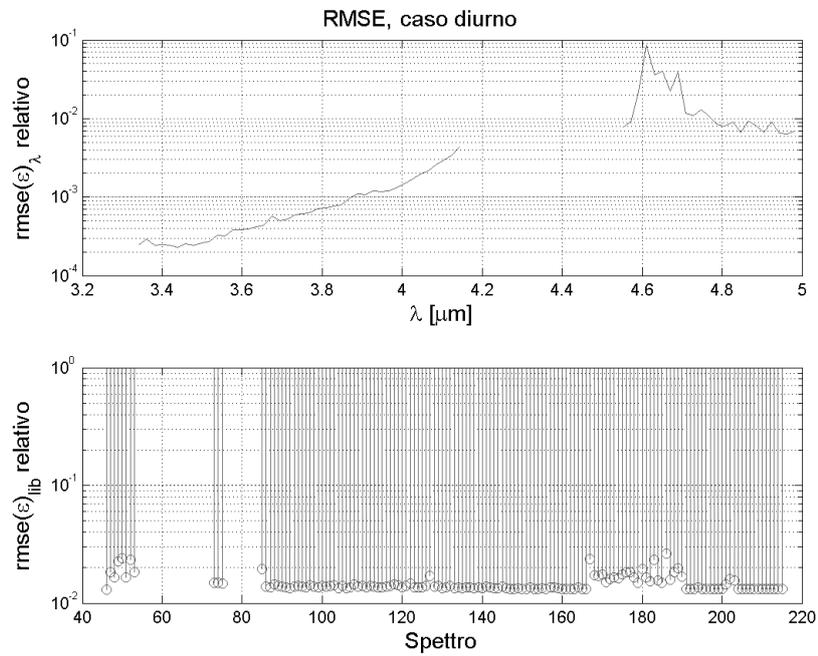
I risultati delle simulazioni, e in particolare le variazioni delle prestazioni nel recupero dell'emissività rispetto alle variazioni nell'entità degli errori introdotti nella temperatura di riferimento, mostrano una inaspettata solidità del modello di trasferimento della radiazione. Apparentemente sembra essere smentito quanto asserito precedentemente, ove si è ampiamente discussa proprio l'instabilità del modello. In realtà non c'è contraddizione nei risultati conseguiti, difatti, nella degradazione del dominio della lunghezza d'onda, si verifica anche una cancellazione di quelle lunghezze d'onda problematiche, per le quali vi era la maggiore instabilità alla risoluzione spettrale di 3 nm, e



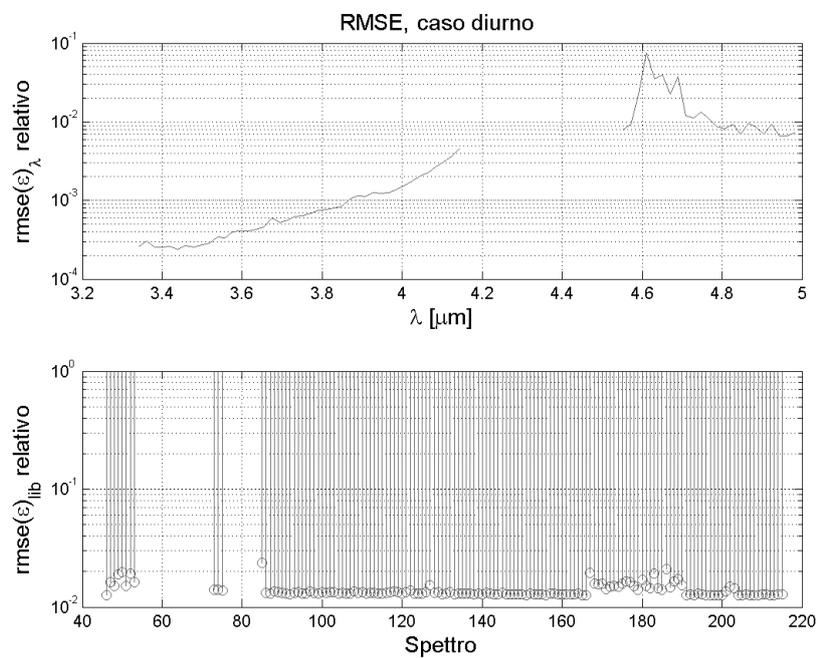
a)



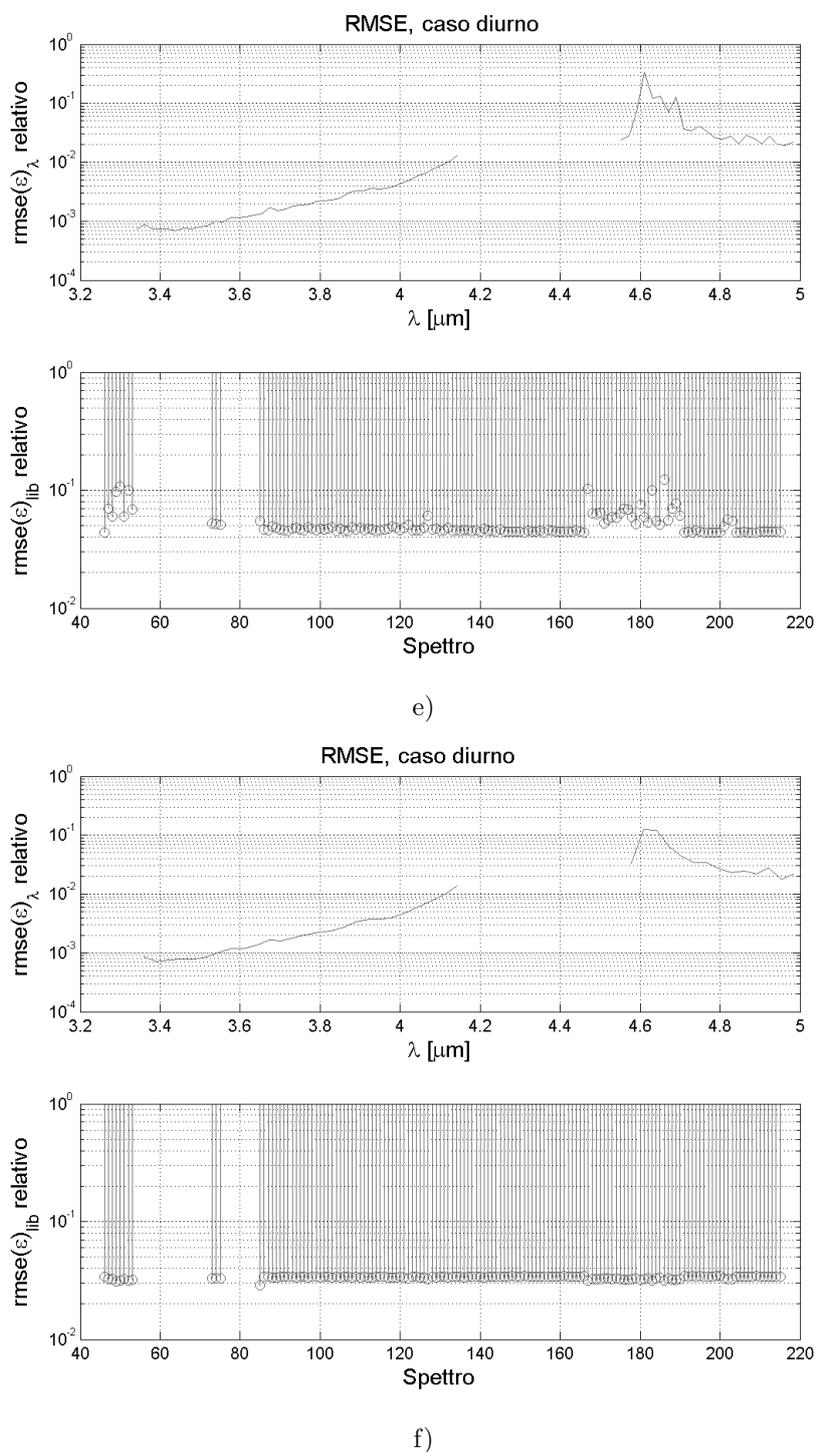
b)



c)



d)

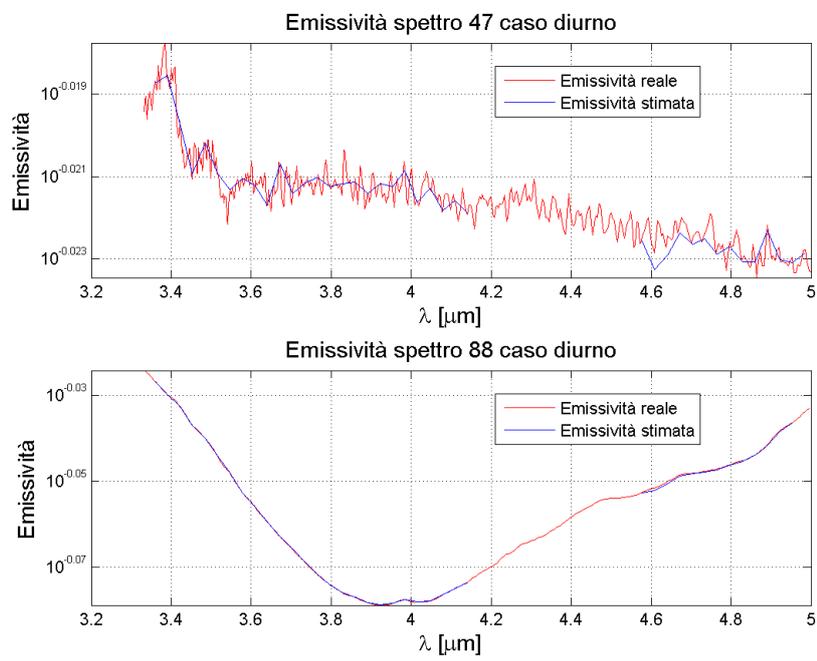


**Figura 6.5:** Prestazioni dell'inversione dell'RTM per dati MASI con temperature perturbate di 0.042 K per difetto a) ed eccesso b), di 0.14 K per difetto c) ed eccesso d) e di 0.42 K per difetto e) ed eccesso f)

di conseguenza il modello appare più stabile. Pur rimanendo la zona spettrale compresa tra 4.6 e 4.7  $\mu\text{m}$  la più delicata ed instabile, i picchi dell'errore quadratico medio sono maggiormente contenuti rispetto alla situazione ottenuta nelle simulazioni dei precedenti capitoli.

È necessario però fare molta attenzione nel valutare i risultati nel recupero dell'emissività tramite inversione del modello di trasferimento della radiazione attraverso la temperatura, più o meno perturbata, estrapolata dalle osservazioni nell'infrarosso termico, soprattutto se si vuole cercare di compararli con l'accuratezza delle emissività spettrali stimate dall'Extended Stepwise Refining quando si considera la piena risoluzione. Supponendo di poter disporre di osservazioni a risoluzione spettrale piena, si deve pesare la maggiore stabilità del modello con il prezzo costituito dalla perdita di informazioni relative a tutte le lunghezze d'onda eliminate per poter davvero effettuare un confronto tra i due casi.

Le variazioni delle emissività spettrali stimate possono essere più o meno rapide, pertanto le basse risoluzioni spettrali possono essere o non essere sufficienti per inseguirle. L'essere costretti a rinunciare ad un campionamento più fitto da un lato, come detto, agevola nel trattare quelle lunghezze d'onda problematiche, ma al contempo può implicare una notevole perdita di informazioni sull'andamento dello spettro di emissività. Un chiaro esempio di ciò è evidenziato dalle stime delle emissività negli spettri 47 e 88 della libreria ASTER (Fig. 6.6). Si nota infatti che la ricostruzione dello spettro ASTER 47 alle risoluzioni spettrali di SEBASS e MASI 600 comporta una notevole perdita rispetto all'andamento dell'emissività a 3 nm di risoluzione; al contrario, la perdita di risoluzione spettrale non comporta eccessive perdite nella ricostruzione dello spettro ASTER 88.



**Figura 6.6:** Problemi di campionamento nel recupero dell'emissività negli spettri 46 e 88 della libreria ASTER

## Conclusioni

Il lavoro intrapreso in questo elaborato di laurea ha considerato il tele-rilevamento nel medio infrarosso, affrontando in particolare la problematica della separazione della temperatura superficiale e dell'emissività spettrale.

La fisica del problema, nel medio infrarosso, presenta un ulteriore ostacolo rispetto all'infrarosso termico, costituito dalla presenza di radiazione solare, comparabile per intensità a quella emessa dal suolo. Se infatti abbondano metodologie di risoluzione del problema del recupero dei parametri di interesse radiativo nel TIR, nel MIR gli algoritmi proposti sono ancora pochi.

Sono dunque stati considerati i vari approcci attualmente esistenti per il recupero della temperatura e dell'emissività nel medio infrarosso. Una possibile strada consiste nell'estendere algoritmi creati per funzionare nel TIR ed adattarli alle differenti condizioni del MIR.

È stato quindi necessario determinare le differenze strutturali nei dati rilevati nelle due distinte zone spettrali dell'infrarosso. Come detto, il medio infrarosso è caratterizzato dalla presenza di radiazione solare riflessa, per cui è necessario considerare condizioni di osservazioni diurne che comprendano questo contributo e condizioni notturne che invece non lo prevedano. Inoltre

va sottolineato che le ipotesi sulle quali si basano gli algoritmi possono non conservarsi dal TIR al MIR, in quanto le radianze variano con la lunghezza d'onda.

Una grande classe di algoritmi distinti sono stati sviluppati nell'infrarosso termico. L'ipotesi sulla quale si basano è la proprietà di *smoothness*, ovvero sia l'osservazione che la radianza *Ground-Leaving* abbia una variazione con la lunghezza d'onda meno marcata di quella *Environmental*. In particolare un metodo estremamente efficiente in presenza di dati ad elevata risoluzione spettrale è risultato essere l'algoritmo Stepwise Refining. Si è dunque proceduto nella strada indicata dagli stessi ideatori dell'algoritmo e nella sua estensione dall'infrarosso termico al medio.

Il primo passo nel prolungare lo Stepwise Refining, passando dall'infrarosso termico al medio, nell'Extended Stepwise Refining, è stato identificare e scegliere il numero di finestre e la relativa ampiezza ottimale ove applicare l'algoritmo al fine di ottenere prestazioni migliori.

L'estensione dell'algoritmo Stepwise Refining dal TIR al MIR è legittima fintanto che la radianza *Ground-Leaving* sia discriminabile da quella *Environmental* tramite un criterio di *smoothness*. Tale condizione è verificata quando l'emissività spettrale si mantiene sufficientemente alta. Quando ciò non avviene, la radianza *Ground-Leaving* è troppo debolmente influenzata dalla radiazione emessa e troppo fortemente da quella *Environmental* per poter discernere con l'ESR.

Per quanto riguarda misurazioni notturne, il modello nel medio infrarosso è analogo a quello nel termico, e, nonostante le differenti quantità di emissioni, le prestazioni dell'Extended Stepwise Refining sono comunque molto buone, con un recupero della temperatura dell'ordine di mezzo millesimo di grado per emissività non basse. La coerenza dei risultati per spettri a media e alta emissività media dimostrano anche una grande robustezza dell'algoritmo, i cui valori di temperatura stimata sono errati solo in caso di basse emissività medie.

In presenza di luce solare, ossia per misurazioni effettuate in condizioni diurne, la distribuzione delle temperature ricavate è maggiormente sensibile al valore dell'emissività media, come dimostra il fatto che gli spettri con valor medio superiore a 0.7 forniscono una stima media con precisione dell'ordine del centesimo di grado e deviazione standard di poco oltre i tre decimi, mentre gli spettri con valor medio compreso tra 0.2 e 0.7 restituiscono una polarizzazione della temperatura stimata e una deviazione standard entrambe di oltre 1.5 gradi.

Per quanto concerne l'emissività spettrale, il suo recupero dipende dall'inversione del modello di trasferimento della radiazione. Tale procedimento evidenzia un problema di instabilità in condizioni diurne nella zona spettrale delimitata dalle lunghezze d'onda 4.6 e 4.7  $\mu\text{m}$ . In questa regione infatti le radianze in gioco assumono tutte valori molto prossimi, rasentando la forma indeterminata 0/0 nel recupero dell'emissività. Ciò comporta un'amplificazione degli errori, ossia anche in presenza di lievi polarizzazioni della temperatura, l'emissività spettrale, in questa banda, viene stimata con errori considerevoli. Tale errore è insito nell'inversione del modello di trasferimento della radiazione e non nell'effettivo impiego dell'algoritmo ESR, ma la variabilità della temperatura ricavabile in condizioni diurne si ripercuote rendendo inutilizzabili alcuni valori di emissività recuperata in questa banda problematica.

L'algoritmo SR si è dimostrato molto efficiente qualora il dato misurato disponga di un'elevata risoluzione spettrale, ma poco robusto alla degradazione di quest'ultima. La possibilità di discernere le due radianze in base ad un criterio di *smoothness* infatti presuppone che la radiazione osservata abbia un campionamento sufficientemente fitto per poter apprezzare la variabilità della stessa. Anche nel MIR, l'ESR dimostra il medesimo limite. Simulando i dati di sensori reali quali il SEBASS e il MASI 600, le stime effettuate sono totalmente errate. L'impossibilità di utilizzare l'ESR con sufficiente affidabilità in presenza di dati reali ha spinto a ricercare una strada alternativa

nel recupero dell'emissività. Si è quindi supposto di poter disporre di una conoscenza sulla temperatura superficiale molto affidabile, presumibilmente ricavabile da osservazioni nel TIR, e si è constatato che la degradazione della risoluzione ha anche l'effetto di stabilizzare notevolmente il recupero dell'emissività riducendo l'amplificazione dell'errore dovuta all'inversione del modello di trasferimento della radiazione alle lunghezze d'onda comprese tra 4.6 e 4.7  $\mu\text{m}$ .

## Appendice - Modtran

Le simulazioni per ricavare i dati di radianza sono ottenute tramite il codice atmosferico Modtran (MODerate resolution TRANsmission) e l'interfaccia grafica per Windows, PcModWin, Version 4.0 v1r1 Version 1.1, Ontar Corporation [15].

Il programma permette di simulare il comportamento dell'atmosfera ed inglobare questa conoscenza nella costruzione delle radianze necessarie. I parametri rilevanti sono stati segnalati nella tabella (Tab. 4.1), e per recuperare le radianze atmosferiche, solari e di corpo nero si è agito nel seguente modo:

- In modalità *Thermal Radiance* non vengono considerati i contributi solari; inoltre, impostando il parametro di *albedo* unitario, l'emissività spettrale è uniformemente nulla (ricordando che essa è complementare all'albedo). Pertanto il contributo riflesso dal suolo *GRND REFL* è costituito esclusivamente dalla radianza atmosferica riflessa:

$$L_{\lambda}^{atm\downarrow} = GRND REFL / TOT TRANS.$$

- Per ricavare il termine di radianza solare è necessario cambiare modalità di simulazione e portarsi nel caso *Radiance with Scattering*. Nuovamen-

te l'*albedo* è unitaria, la componente di riflessione diretta *DRCT REFL* include dunque esclusivamente il termine di radiazione solare:

$$L_{\lambda}^{sun} = DRCT REFL / TOT TRANS.$$

- La radianza di corpo nero è facilmente ricavabile implementando una funzione che esegua la legge di Planck (1.3), altrimenti può essere ricavata dalla radiazione emessa *SURF EMISS* tramite una simulazione con *albedo* nulla, in modo da non avere alcuna riflessione ma solo componente emessa:

$$L_{\lambda}^{bb}(T_s) = SURF EMISS / TOT TRANS.$$

Si nota infine che tutte le radianze sono state normalizzate per la trasmittanza atmosferica *TOT TRANS*, anch'essa ottenuta mediante le simulazioni stesse, poiché in questo elaborato vengono considerati dati con correzione atmosferica già effettuata.

# Appendice **B**

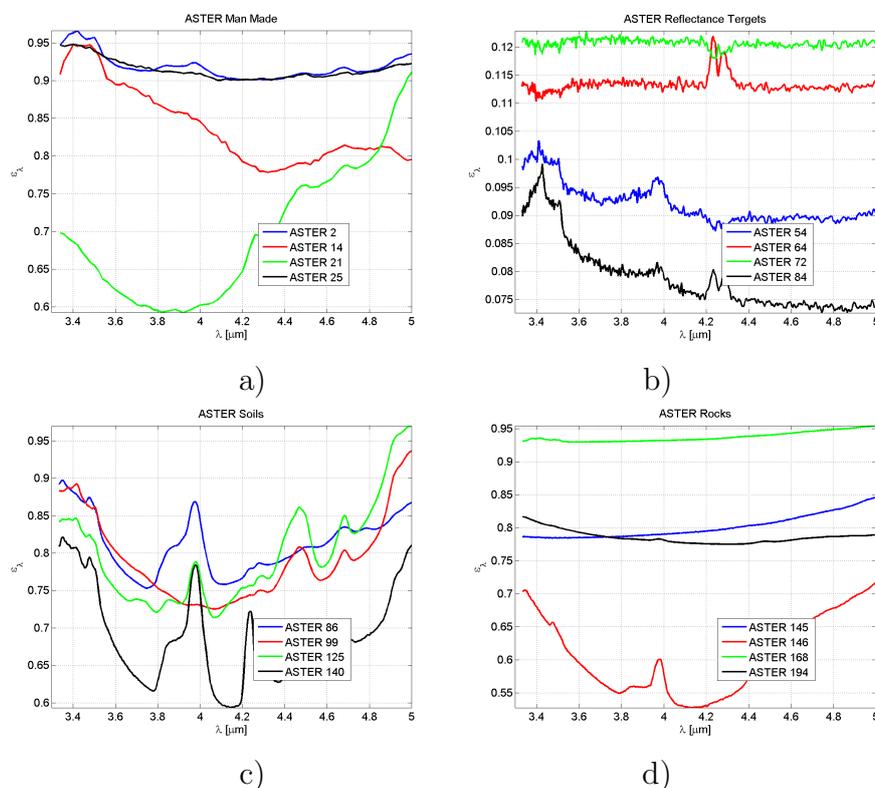
## Appendice - Librerie Spettrali

### B.1 ASTER

La libreria spettrale ASTER Advanced Spaceborn Thermal Emission Reflection Radiometer [16] include dati provenienti dalle librerie spettrali della Johns Hopkins University Spectral Library (JHU), della Jet Propulsion Laboratory Spectral Library (JPL) e della United States Geological Survey Spectral Library (USGS - Reston). Le emissività fornite sono dati iperspettrali che includono osservazioni effettuate da piattaforme remote aeree e spaziali, quanto da misurazioni *in situ*. Esse forniscono dati che si estendono sia nel visibile che nella gamma dell'infrarosso, dal vicino al termico.

I 215 spettri comprendono diverse tipologie di suoli e materiali per fornire un insieme eterogeneo piuttosto significativo. Vi sono infatti classi che comprendono vari tipi di asfalti, di mattoni, di materiali generalmente usati nell'edilizia, vernici, materiali di natura metallica quanto di natura plastica, con lo scopo di fornire una gamma di emissività tipiche di un ambiente urbano (Fig. B.1 a), includendo anche una serie di riflettori a bassa emissività (Fig. B.1 b). Vi sono poi spettri relativi alle emissioni di minerali tipici di suoli naturali quali sabbie, argille, terreni vari (Fig. B.1 c). Anche suoli rocciosi vengono considerati, includendo emissioni di tipologie di basal-

to, granito, gabbro, quarzo e tanti altri minerali rocciosi comuni (Fig. B.1 d).



**Figura B.1:** Emissività della libreria ASTER per spettri di classe a) Man Made, b) Reflectance Targets, c) Soils e d) Rocks

In figura sono riportati gli andamenti di spettri esemplificativi relativi alle quattro classi sopra citate. Per quanto concerne i materiali Man Made, gli spettri numero 2, 14, 21 e 25 corrispondono rispettivamente ai materiali Construction Asphalt, Pine Wood, Bare Red Brick e Terra Cotta Tiles. Gli spettri 54, 64 e 72 sono Brass Plate e l'84 è un Golden Plate, tutti appartenenti alla classe dei Reflectance Targets. Delle emissività della classe Soils sono stati rappresentati gli spettri 86, 99, 125 e 140, relativi ai suoli Dark Brown Interior Moist Clay Loam, Pine Wood, Bare Red Bricks e Terra Cotta Tiles. Infine le rocce della classe Rocks corrispondono a Basaltic Andesite per gli spettri 145 e 168, Anorthosite e Hornfels per gli spettri 146 e 194.

## B.2 MODIS

Le emissività spettrali della Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS) UCSB Emissivity Library sono una collezione di spettri misurati in laboratorio di campioni di materiali suddivisi in quattro categorie:

- Water, ice and snow;
- Soil and mineral;
- Vegetation;
- Man Made materials.

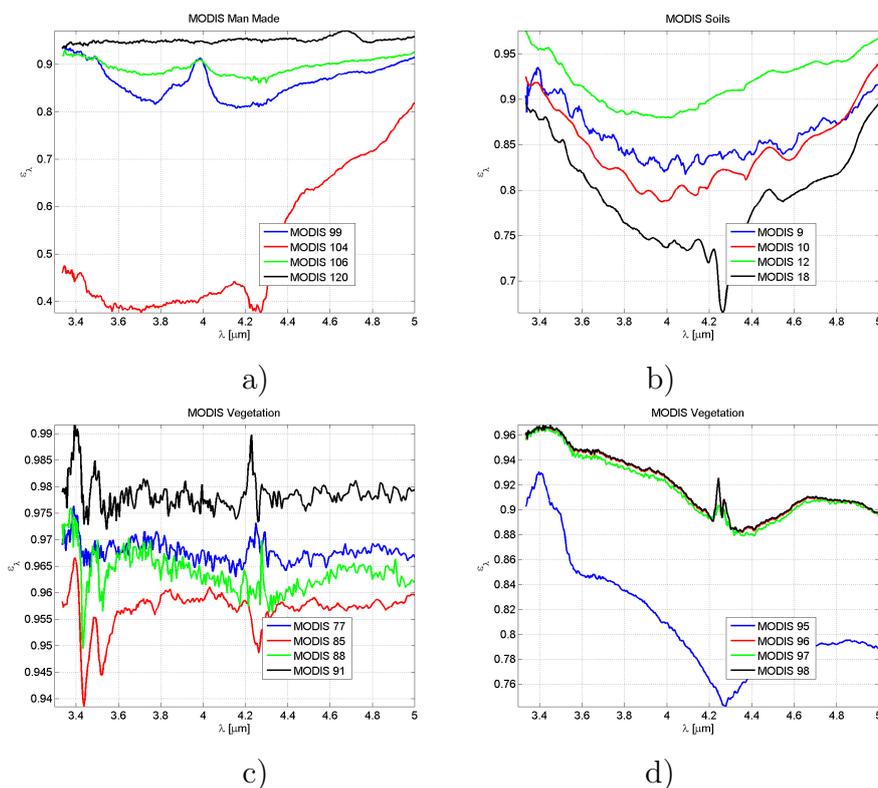
La prima classe è caratterizzata da materiali ad emissività piuttosto elevata, solitamente compresa tra 0.94 e 0.99 nell'infrarosso; nel visibile la neve ha invece un'alta riflettanza.

I suoli e i minerali sono contraddistinti da caratteristiche spettrali marcate che li distinguono in base al materiale quanto alla dimensione dei frammenti che li compongono, specialmente per quanto concerne l'infrarosso termico. Nel medio infrarosso invece assume notevole importanza il contenuto organico e la percentuale di umidità. Più il suolo è secco, più basse risultano essere le sue emissioni.

La vegetazione, a seconda che sia verde o secca, è contraddistinta da una abbondante o minima quantità di acqua che si ripercuote con emissioni alte o basse.

Infine, i materiali Man Made. I metalli lucidi sono ovviamente caratterizzati da scarse emissioni e alte riflessioni, anche dell'ordine del 99%, mentre materiali come asfalto o mattoni sono solitamente contraddistinti da emissività tra 0.90 e 0.98.

Nelle simulazioni effettuate in questo elaborato di laurea non sono stati utilizzati i dati relativi alla classe di acqua, ghiaccio e neve perché non disponibile. Per quanto riguarda le altre classi, in figura (Fig. B.2) sono rappresentate le emissività relative a campioni di suolo del Nebraska (spettro 9) e dell'Oklahoma (spettri 10, 12 e 18), emissività Man Made invece comprendono campioni di mattoni (spettri 99 e 104) e di tegole (spettri 108 e 120). Per la vegetazione sono riportati gli andamenti delle emissività delle foglie di eucalipto (spettro 77), magnolia (spettro 85), quercia (spettro 88) e pino (spettro 91); e campioni di foglie secche (spettri 96, 97 e 98) e di corteccia (spettro 95).

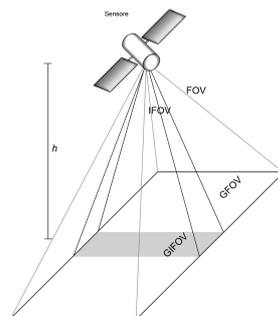


**Figura B.2:** Emissività della libreria MODIS per spettri di classe a) Man Made, b) Soils, c) e d) Vegetation

# Appendice C

## Appendice - I Sensori nel MIR

Il telerilevamento consiste nell'osservazione della superficie terrestre da postazione remota. Nel descrivere il processo di acquisizione è dunque opportuno descrivere brevemente il modo in cui i sensori registrano la radiazione proveniente dal suolo nonché le varie metodologie utilizzate per ricoprire la zona osservata.



**Figura C.1:** Geometria di acquisizione

A questo proposito è utile introdurre alcuni parametri, i quali forniscono preziose informazioni riguardo la tipologia di dati che un sensore misura. L'angolo solido che un singolo fotorivelatore sottende, denominato IFOV (*Instantaneous Field Of View*), infatti, con la conoscenza della quota di volo o di orbitazione  $h$  della postazione remota di osservazione, permette di calco-

lare l'area della superficie terrestre che quel fotorivelatore può osservare, cioè la risoluzione spaziale dello strumento, denominata GIFOV (*Ground Instantaneous Field Of View*), con l'ausilio di semplici considerazioni trigonometriche:

$$GIFOV = 2h \tan \left( \frac{IFOV}{2} \right) \approx h \cdot IFOV. \quad (C.1)$$

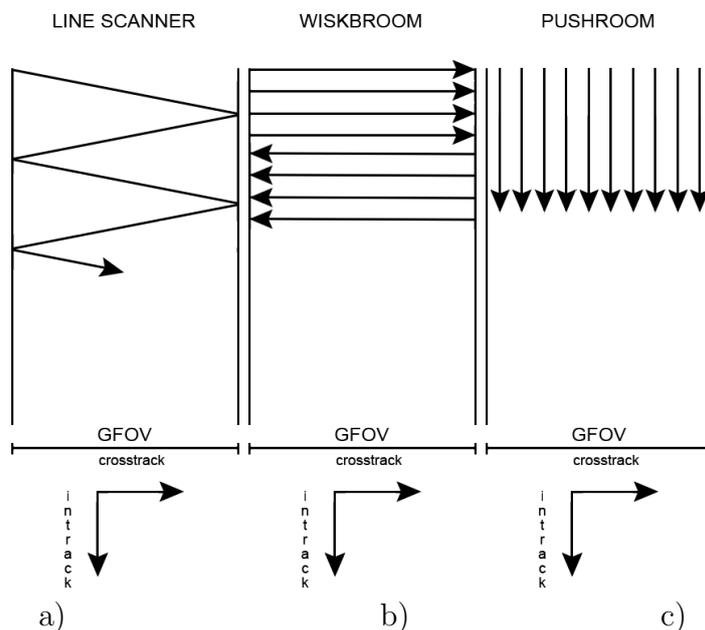
Attraverso diverse metodologie di acquisizione i sensori riprendono una scena a terra la cui estensione GFOV (*Ground Field Of View*) è determinata nuovamente dalla quota e dall'angolo solido complessivo sotteso dal sensore e denominato FOV (*Field Of View*):

$$GFOV = 2h \tan \left( \frac{FOV}{2} \right) \approx h \cdot FOV; \quad (C.2)$$

Le procedure di acquisizione che sono state introdotte riguardano le diverse metodologie in cui i fotorivelatori di un sensore ricoprono l'intera scena a terra (Fig. C.2). Un unico sensore che si muove nella direzione ortogonale (*crosstrack*) a quella in cui si muove il sensore (*intrack*) è il metodo di scansione *LINE SCANNER*. La scansione *WISKBROOM* prevede invece un array di fotorivelatori che si muove in direzione di *crosstrack*, mentre i sensori che adoperano una soluzione di tipo *PUSHROOM* utilizzano comunque array di fotorivelatori ma che si muove lungo la medesima direzione del sensore.

I sensori che lavorano nell'infrarosso sono solitamente di due tipi. L'osservazione multispettrale è realizzata da una classe di spettrometri tramite la dispersione ottenuta tramite l'impiego di un prisma; alternativamente si utilizzano interferometri di Fourier, strumenti che sfruttano la coerenza delle interferenze tra radiazioni deviate meccanicamente su diversi cammini ottici.

Le tecnologie adoperate per la realizzazione dei sensori permettono infine di distinguerli in *cooled* o *uncooled detectors*. I semiconduttori utilizzati nella realizzazione dei sensori infatti possono interferire con le radiazioni misurate emettendo essi stessi, pertanto sensori che lavorano a temperature più bas-



**Figura C.2:** Differenti tipologie di scansione

se, ossia i *cooled detectors*, hanno emissioni inferiori e consentono di ottenere una sensibilità più elevata dello strumento. Di contro, i sensori *uncooled*, non richiedendo tecniche di raffreddamento particolari, al netto di una sensibilità limitata consentono una riduzione di ingombri, di consumi e di costi.

## C.1 SEBASS

Il sensore Spatially Enhanced Broadband Array Spectrograph System, è il risultato di un progetto di ricerca nato nel 1993 e portato avanti negli anni dall'Aerospace Corporation. SEBASS è uno spettrometro a dispersione tramite prisma, raffreddato a 10 K tramite elio liquido, che permette di ottenere dati iperspettrali nell'infrarosso medio tra i 3.0 e i 5.5  $\mu\text{m}$  e nell'infrarosso termico tra i 7.8 e i 13.5  $\mu\text{m}$ . Le immagini iperspettrali sono acquisite mediante una scansione di tipo *PUSHROOM*, attraverso una coppia di array di 128 fotorivelatori.

Nella zona spettrale dell'infrarosso termico, i 128 fotorivelatori garantiscono una risoluzione spettrale media di circa 50 nm, mentre nel medio infrarosso tale parametro è mediamente pari a 25 nm.

L'IFOV del SEBASS è un miliardesimo di radiante, il FOV dunque raggiunge i  $7.3^\circ$  che corrispondono a 128 mRad. L'Aerospace Corporation utilizza una piattaforma aerea Twin Otter sulla quale è montata il SEBASS, la sua quota di volo solitamente può variare dai 600 ai 7000 metri, ad una quota intermedia di 3000 la scena illuminata dal sensore ha quindi un'ampiezza di quasi 400 metri mentre la risoluzione è circa 3 metri.

## C.2 MASI 600

A differenza del SEBASS che permette di osservare contemporaneamente immagini su entrambe le bande dell'infrarosso termico e medio, l'Itres affida questo compito a due sensori distinti. Il TASI 600 si occupa delle lunghezze d'onda comprese tra gli 8 e gli  $11.5 \mu\text{m}$ , mentre il medio infrarosso tra i 3 e i  $5 \mu\text{m}$  è coperto dal MASI 600.

Come il SEBASS, anche MASI 600 è uno spettrometro a dispersione tramite prisma di tipo *cooled*, ma di tipologia MCT, ossia di telluriurio di cadmio mercurio, e sempre analogamente al sensore SEBASS, utilizza una metodologia di acquisizione di tipo *PUSHBROOM*, con un array composto però da 64 fotorivelatori. per una risoluzione spettrale di circa 32 nm.

L'angolo solido sotteso da ciascun fotorivelatore è di circa 1.2 mRad mentre il FOV totale è dell'ordine dei  $40^\circ$ . Il MASI 600 è pensato per misurazioni da piattaforma aerea e può lavorare ad una quota massima di circa 3000 m. La copertura terrestre, in queste condizioni, sono di circa 2.5 m per quanto

concerne il GIFOV e di oltre 2000 m di GFOV.



**Figura C.3:** Sensore MASI

# Bibliografia

- [1] J. C. Maxwell. A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1865.
- [2] G. R. Kirchhoff. On the relation between radiating and absorbing powers of different bodies for light and heat. *Annalen der Physik*, Vol. 109, 1860.
- [3] M. Planck. On the Law of Distribution of Energy in the Normal Spectrum. *Annalen der Physik*, Vol. 4, January 1901.
- [4] J. H. Lambert. *Photometria*. 1760.
- [5] J. Stefan. Über die beziehung zwischen der wärmestrahlung und der temperatur. *Sitzungsberichte der mathematisch-naturwissenschaftlichen Classe der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften*, Vol. 79, 1879.
- [6] L. Boltzmann. Ableitung des stefan'schen gesetzes, betreffend die abhängigkeit der wärmestrahlung von der temperatur aus der electro-magnetischen lichttheorie. *Annalen der Physik und Chemie*, Vol. 22, 1884.
- [7] W. R. McCluney. *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing*. Academic Press, Elsevier, 2007.
- [8] J. Cheng, S. Liang, Q. Liu, and X. Li. Temperature and Emissivity Separation From Ground-Based MIR Hyperspectral Data. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 49, No. 4, April 2011.

- [9] N. Wang, H. Wu, F. Nerry, C. Li, and Z. L. Li. Temperature and Emissivity Retrievals From Hyperspectral Thermal Infrared Data Using Linear Spectral Emissivity Constraint. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 49, No. 4, April 2011.
- [10] D. K. Zhou, A. M. Larar, X. Liu, W. L. Smith, L. L. Strow, P. Yang, P. Schlüssel, and X. Calbet. Global Land Surface Emissivity Retrieved from Satellite Ultraspectral IR Measurements. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 49, No. 4, April 2011.
- [11] C. C. Borel. Surface Emissivity and Temperature Retrieval for a Hyperspectral Sensor. *Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings*, 1998.
- [12] K. Kanani, L. Poutier, F. Nerry, and M. P. Stoll. Directional Effects Consideration to Improve Out-Doors Emissivity Retrieval in the 3-13  $\mu\text{m}$  Domain. *Optics Express*, Vol. 15, No. 19, September 2007.
- [13] J. Cheng, S. Liang, J. Wang, and X. Li. A Stepwise Refining Algorithm of Temperature and Emissivity Separation for Hyperspectral Thermal Infrared Data. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 48, No. 3, March 2010.
- [14] D. Maravalle. Studio di metodi per la separazione di temperatura ed emissività in immagini ad elevata risoluzione spettrale nell'infrarosso termico, May 2011.
- [15] Ontar Corporation. *PcModWin Manual*. June 2002.
- [16] A.M. Baldridge, S.J. Hook, C.I. Grove, and G. Rivera. The ASTER spectral library version 2.0. *Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology*, October 2008.