

**Mappe di temperatura ottenute  
mediante elaborazione di dati satellitari  
e integrate in un  
Sistema Informativo Geografico**

*Dott.ssa Annalisa Palazzo*

*Tutor: Ing. Valter Sambucini*

*Con la collaborazione dell' Ing. Giuliano Cecchi*

*Con la collaborazione dell' Ing. Michele Munafò*

# Prefazione

Questo lavoro nasce dalla necessità sempre più forte di monitorare alcune risorse naturali per controllarne le soglie di inquinamento. In particolare esso si propone di studiare la possibilità di utilizzo dei dati satellitari per stimare la temperatura superficiale del mare in modo da avere una copertura spaziale e temporale più ampia di quella attuale.

Oggi la temperatura del mare viene misurata direttamente a diverse profondità dalla superficie mediante campagne a mare promosse dalle varie ARPA regionali. In queste campagne, effettuate due volte al mese, la temperatura viene misurata in alcune stazioni di misura che si trovano a diversa distanza dalla costa. Come si può intuire le misure ottenute sono parziali, ma a causa dell'elevato costo di tali misurazioni, non è possibile aumentare il numero delle stazioni né la frequenza di misura. In questo ambito si inserisce questo lavoro di stage in cui vengono utilizzati i dati satellitari Modis (distribuiti gratuitamente), aventi risoluzione ad 1km, per stimare la temperatura del mare lungo le coste italiane. La temperatura del mare così calcolata è confrontata con quella misurata direttamente nelle campagne promosse dalle ARPA e un'analisi di tipo statistico valuta l'errore che si commette utilizzando i dati satellitari al posto dei dati puntuali di temperatura.

Un altro obiettivo di questo lavoro è quello di ottimizzare l'algoritmo di calcolo della temperatura da dati Modis, per le coste italiane in modo da migliorare l'accordo tra la temperatura misurata e quella calcolata lungo le coste e di diffondere tali risultati alla comunità scientifica e non, pubblicandoli su un sito web.

Il lavoro fatto mostra l'utilità dell'impiego dei dati satellitari al posto di quelli puntuali per calcolare la temperatura superficiale del mare ed apre la strada all'utilizzo dei dati satellitari anche per stimare altre grandezze fisiche.

## Abstract

Questo lavoro si propone come obiettivo lo studio della possibilità di integrazione tra i dati puntuali di temperatura del mare, misurati in varie stazioni di misura lungo le coste italiane, con lo stesso dato di temperatura ricavato mediante elaborazione di dati satellitari provenienti dal sensore Modis (Moderate Resolution Imaging Spectrometer) di proprietà della NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). Si parla, in tal caso, di Sea Surface Temperature (SST).

La necessità di compiere questo studio deriva dalla scarsa disponibilità temporale e spaziale delle misure puntuali rispetto ai dati satellitari Modis, disponibili gratuitamente sul sito della Nasa e aventi copertura globale. In tale lavoro è stato studiato, quindi, l'accordo tra le due serie di misure di temperatura dimostrando che è possibile usare la stima di temperatura ottenuta elaborando il dato satellitare al posto delle misure effettuate in sito con una buona precisione ottenendo così una notevole riduzione dei costi e una maggiore copertura spaziale e temporale.

La Nasa fornisce un prodotto di SST calcolato, utilizzando i dati Modis, mediante un algoritmo standard che ha una precisione di circa un grado in mare aperto. È importante osservare che tale prodotto è stato realizzato tenendo conto di tutti i problemi legati all'elaborazione del dato satellitare quali la presenza di pixel nuvolosi, le correzioni dovute alla presenza dell'atmosfera e la presenza di pixel contaminati a causa della vicinanza alla terra. Questo ha portato ad un dataset di punti disponibili in corrispondenza delle stazioni di misura a mare piuttosto ridotto.

Nella prima parte del lavoro ho analizzato l'adattabilità di tale prodotto (che d'ora in avanti chiamerò prodotto Modis di SST) lungo le coste italiane eseguendo il confronto per l'anno 2003 tra la temperatura stimata dai dati satellitari e la

temperatura misurata direttamente per ciascuna stazione di misura lungo le coste pugliesi.

Il confronto ha rilevato un accordo tra le due serie di misure di circa un grado come ci si aspettava, ma la scarsità di punti disponibili per il confronto non ha permesso di dire con un buon margine di certezza che il prodotto Modis di SST si potrebbe utilizzare lungo le coste italiane bene come in mare aperto. Perciò, è stato necessario implementare un modello specifico per le coste cercando di ottimizzare i coefficienti dell'algoritmo standard utilizzato per il calcolo della SST.

L'elaborazione di questo modello ha richiesto l'implementazione di maschere per l'individuazione di pixel nuvolosi utilizzando dei criteri differenti rispetto a quelli utilizzati nel prodotto Modis di SST. Questo è stato fatto abbastanza semplicemente riducendo la severità dei test fatti sulle nuvole in modo da conservare l'informazione costiera. Di solito, infatti, i pixel costieri sono scartati dalle maschere di nuvole fornite sul sito della Nasa, perché spesso contaminati da sedimenti, sostanze gialle dovute alla presenza della terra.

Per la determinazione dei coefficienti, ho scelto un set di dati per la calibrazione del modello mediante confronto con i valori di temperatura misurati direttamente a mare e un set per la validazione dello stesso in modo da poter verificare il set di coefficienti trovati su un altro dataset di punti.

Determinati i coefficienti ho eseguito il confronto per l'anno 2003 tra la temperatura stimata dai dati satellitari, utilizzando il nuovo algoritmo, e la temperatura misurata direttamente per ciascuna stazione di misura lungo le coste pugliesi. Il confronto ha rilevato un maggior numero di pixel disponibili rispetto al caso del prodotto Modis di SST sebbene l'accordo tra la temperatura misurata e la temperatura stimata da satellite sia leggermente inferiore rispetto al prodotto Modis di SST.

Il prodotto ottimizzato è comunque più adatto rispetto al prodotto Modis di SST ad essere utilizzato lungo le coste, mentre nulla si può dire sulla situazione in mare aperto.

Nell'ultima parte del lavoro, ho importato i risultati ottenuti in un sistema informativo geografico (GIS) realizzando una mappa di temperatura per il prodotto Modis di SST ed una per il prodotto di SST ottimizzato. Inserendo nel GIS, un layer

relativo alle temperature misurate a mare, è possibile fare un confronto immediato tra la temperatura del mare misurata e la temperatura del mare stimata dai dati satellitari.

Al fine di rendere tali risultati consultabili da un utente esterno ho pubblicato il progetto sul sito web Cartanet dell'Apat, in cui è possibile effettuare tutte le operazioni di interrogazione dei layer disponibili e fare un confronto immediato, come nel GIS, tra la temperatura misurata e quella stimata.

Una differenza di temperatura di poco più di un grado tra le due serie di misure rende l'esperimento riuscito ed apre la strada all'utilizzo dei dati satellitari per ricavare alcuni parametri fisici con una notevole riduzione dei costi ed una copertura spaziale e temporale decisamente superiore rispetto al caso di misura diretta in sito.

# Indice

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Introduzione</b>   | <b>1</b>  |
| <br>  |           |
| <b>1 La Sea Surface Temperature</b>   | <b>4</b>  |
| 1.1 Scelta delle bande Modis .....  | 4         |
| 1.2 Un'introduzione fisica al problema .....  | 6         |
| 1.3 Algoritmi di calcolo della SST: stato dell'arte .....   | 9         |
| 1.4 Problemi nella validazione degli algoritmi che stimano la SST da misure<br>da satellite ..... | 13        |
| <br>  |           |
| <b>2 Come discriminare il cielo sereno dal cielo nuvoloso</b>                                     | <b>16</b> |
| 2.1 Implementazione della cloud mask .....  | 16        |
| 2.2 Input ed output dell'algoritmo di cloud mask .....  | 18        |
| 2.2.1 Input all'algoritmo .....   | 19        |
| 2.2.2 Output all'algoritmo .....  | 19        |
| 2.3 I test principali della cloud mask .....  | 21        |
| 2.3.1 Procedura di cloud mask implementata .....  | 23        |
| <br>  |           |
| <b>3 Cenni di Sistemi Informativi Geografici (GIS)</b>  | <b>24</b> |
| 3.1 Cos'è un GIS? .....   | 24        |
| 3.1.1 Perché usare un GIS .....   | 25        |
| 3.2 Modelli di dati .....   | 26        |
| 3.2.1 Tipologie di dati geografici .....  | 27        |

|  |               |
|--|---------------|
| <b>4 Processing del dato satellitare</b>   | <b>29</b>     |
| 4.1 Calcolo della SST dalle radianze di livello L1B .....                        | 30            |
| 4.2 Misure puntuali in sito .....  | 32            |
| 4.3 Confronto della SST Modis Con le misure puntuali .....                       | 32            |
| 4.4 Calibrazione e validazione dei nuovi coefficienti per il calcolo della SST . | 38            |
| 4.5 Realizzazione della mappa di temperatura nel GIS .....                       | 41            |
| <br><b>Conclusioni</b>   | <br><b>46</b> |
| <br><b>Bibliografia</b>  | <br><b>48</b> |
| <br><b>Appendice A Modis</b>   | <br><b>50</b> |
| <br><b>Appendice B Codici Matlab implementati</b>                                | <br><b>53</b> |
| B.1 Estrazione delle informazioni da un hdf .....                                | 53            |
| B.2 Calcolo della temperatura di brillantezza .....                              | 55            |
| B.3 Scelta delle stazioni di calibrazione e validazione .....                    | 55            |
| B.4 Stima dei nuovi coefficienti .....   | 58            |

# Introduzione

Negli ultimi anni è sempre più impellente la necessità di avere a disposizione sistemi di monitoraggio ambientale di tipo globale a causa dell'incremento di catastrofi naturali quali incendi, frane, desertificazione, innalzamento della temperatura terrestre ecc.

L'uomo non riesce a impedire il realizzarsi di tali eventi, ma può arginarne i danni monitorando tali fenomeni con l'utilizzo di nuove tecnologie. È in questo ambito che il telerilevamento satellitare, più conosciuto con il termine di remote sensing, ha i suoi maggiori sviluppi.

Attualmente si definisce remote sensing l'arte di acquisire informazioni sulla superficie terrestre senza entrare in contatto con essa. Lo scenario di una zona sulla superficie terrestre si può ricostruire mediante registrazione, analisi e processing dell'energia riflessa o emessa da un corpo sulla superficie stessa.

Di seguito si descrive, in breve, come avviene l'acquisizione di una data scena da satellite utilizzando il principio del telerilevamento.

Il processo, mediante il quale si ha la registrazione del segnale, coinvolge una interazione tra la radiazione incidente e il bersaglio di interesse e ha bisogno di una fonte di energia che illumina l'oggetto. Prima di colpire il bersaglio, la sorgente di illuminazione entra in contatto ed interagisce con l'atmosfera che attraversa. Una volta raggiunto il bersaglio, la radiazione incidente interagisce con lo stesso in un modo che dipende dalle proprietà del bersaglio e della radiazione.



L'energia viene poi riemessa all'indietro dall'oggetto e raggiunge il sensore che la raccoglie e la registra. La radiazione elettromagnetica è poi trasmessa, spesso in formato elettronico, ad una stazione di ricezione e processing di dati dove essi sono elaborati e trasformati in un'immagine.

L'immagine elaborata è interpretata otticamente o in modo digitale per estrarre da essa le informazioni riguardo al bersaglio illuminato. Il passo finale del processo di remote sensing è raggiunto quando si è in grado di applicare le informazioni estratte dall'immagine per ottenere nuove informazioni riguardo al bersaglio stesso, per meglio comprenderlo o per risolvere determinati problemi<sup>1</sup> [1] quali ad esempio il monitoraggio di problemi di tipo ambientale, come ad esempio quello affrontato in questo lavoro.

Il lavoro si articola in due grandi fasi: una di elaborazione delle immagini satellitari e una di inserimento delle informazioni ottenute in un sistema informativo geografico e conseguente realizzazione di un servizio internet in cui siano raccolte le informazioni ottenute.

Esso si propone di studiare la possibilità di integrazione tra dati satellitari e dati puntuali al fine di usare i primi là dove i secondi non siano disponibili per avere un monitoraggio più completo, nello spazio e nel tempo, di alcuni parametri fisici, chimici ecc. Come esempio di tale integrazione si vuole realizzare una mappa di temperatura lungo le coste italiane e valutarne la precisione confrontandola con i dati puntuali di misura in sito.

Nel primo capitolo si descrive la sea surface temperature da un punto di vista teorico e lo stato dell'arte degli algoritmi per stimare la SST (*sea surface temperature*). Si descrivono, inoltre, i problemi più comuni che si incontrano nel determinare la SST usando misure da satellite.

Nel secondo capitolo si affronta, in particolare, uno dei problemi principali che si incontrano nella stima della SST: la presenza di nuvole. Si descrive in particolare l'algoritmo Modis per la identificazione delle stesse, vantaggi e svantaggi dello stesso. L'ultimo paragrafo di questo capitolo, è dedicato all'implementazione di una cloud mask specifica per l'applicazione che si intendeva realizzare in questo lavoro.

---

<sup>1</sup> Fundamentals of Remote Sensing, Natural Resources of Canada

Nel terzo capitolo, si introducono, in breve, i Sistemi Informativi Geografici.

Nel quarto capitolo, che costituisce la parte originale di questo lavoro di stage, si descrivono le procedure utilizzate e i risultati ottenuti nel calcolo della SST. Inoltre vi è una sezione dedicata alle procedure utilizzate per la realizzazione della mappa di temperatura in un sistema informativo geografico e per la pubblicazione del lavoro sul sito internet di Cartanet.

# Capitolo 1

## La Sea Surface Temperature

La temperatura superficiale del mare, detta anche SST (*sea surface temperature*), è una fondamentale variabile geo-fisica che ha importanti applicazioni in molti problemi di interesse attuale. Mappe regionali di SST sono importanti per determinare la pescosità di una data zona, mentre mappe globali di SST sono utili per monitorare i cambiamenti climatici.

Essa è una variabile di controllo nello scambio atmosfera-oceano di calore, gas, e composti vari e i suoi modelli di comportamento rivelano variabilità oceanica sotto superficiale.

La difficoltà nel fare misure adeguate di SST può essere risolta usando radiometri satellitari che sono in grado di fornire misure su scala globale, in cicli periodici di ore o giorni. Ad esempio, il sensore MODIS a bordo dei satelliti TERRA e AQUA della NASA è utilizzato per tali rilevazioni.

### 1.1 Scelta delle bande Modis

Misure abbastanza accurate di SST si ottengono con il sensore Modis ( Moderate Resolution Imaging Spectrometer) che è particolarmente adatto alla rilevazione di fenomeni oceanici. Esso ha 36 bande alcune con risoluzione ad 1Km e altre con

risoluzione a 250m. In particolare, ha un numero di bande nel medio e lontano infrarosso ottimizzate per la determinazione della SST (si veda la tabella 1.1).

| Numero di banda | Centro banda (mm) | Ampiezza di banda (mm) |
|-----------------|-------------------|------------------------|
| 20              | 3.750             | 0.1800                 |
| 22              | 3.959             | 0.0594                 |
| 23              | 4.050             | 0.0608                 |
| 31              | 11.030            | 0.5000                 |
| 32              | 12.020            | 0.5000                 |

**Tabella 1.1: Bande Modis nell'infrarosso per il calcolo della SST.**

Tali bande sono state scelte tenendo conto della trasmissività della colonna atmosferica attraversata dalla radiazione proveniente dal satellite nella parte del medio e lontano infrarosso dello spettro elettromagnetico.

Le bande che hanno una lunghezza d'onda di centro banda intorno ai  $4\mu\text{m}$ , risentono di una bassa influenza atmosferica dovuta essenzialmente ad assorbimento di vapor d'acqua. A queste lunghezze d'onda, però, la curva di emissione di corpo nero del Sole è confrontabile con quella terrestre. Invece, le bande intorno ai  $10\mu\text{m}$  e  $12\mu\text{m}$  (31 e 32 per Modis) sono localizzate vicino al massimo di emissione per un corpo nero che si trova alla temperatura di 300K (una buona approssimazione per la temperatura media terrestre), ma risentono di una più grande influenza atmosferica rispetto a quelle del medio infrarosso.

È importante notare, però, che tali bande risentono di un assorbimento di vapor d'acqua che è simile per entrambe. Utilizzando, quindi, una tecnica di calcolo della SST, detta *split window* (di cui si accennerà più avanti), è possibile rendere trascurabile tale contributo. Per questo motivo, per la determinazione della SST sono state scelte le bande dell'infrarosso lontano.

La tecnica dello *split window*, infatti, considera come termini correttivi al calcolo della SST la differenza delle bande nel lontano infrarosso in modo da rendere trascurabile il contributo atmosferico.

## 1.2 Un'introduzione fisica al problema

Derivare in maniera accurata la temperatura superficiale del mare dipende dall'abilità di correggere gli effetti di disturbo presenti in queste bande spettrali quali, ad esempio, contributo atmosferico, presenza di fenomeni nuvolosi, errori dovuti a grandi angoli di acquisizione ecc.

Nella trattazione seguente si assume che:

- gli unici effetti di disturbo atmosferici presenti nelle bande del TIR (*thermal infrared*) siano dati dall'assorbimento del vapor d'acqua
- la variazione di ozono sia minima
- non vi sia presenza di nuvole

In tal caso si può mostrare che, per un'atmosfera in cui non siano presenti particolari fenomeni di scattering, quale quella che si sta considerando in questa trattazione, la radianza nell'infrarosso ad un livello di pressione  $P_x$  calcolato a partire dallo strato più alto dell'atmosfera a temperatura  $T_0$  e pressione  $P_0$ , si esprime come [2]<sup>2</sup>:

$$L_I = L_I(\text{Superficie}) t_I(O, P_0) - \int_0^{P_0} B_I[T(P)] dt_I(O, P_0) \quad (1.1)$$

dove  $L_\lambda$  rappresenta la radianza,  $t_\lambda(O, P_x)$  la trasmissività ad un livello di pressione  $P_x$  e  $B_\lambda(T)$  la funzione di Planck che esprime la radianza (energia riflessa per  $\text{m}^2$  e per steradiani) in funzione della temperatura di brillantezza a fissata  $\lambda$ .

Se si definisce:

$$B_I(T_0) = L_I(\text{Superficie}) t_I(O, P_0) \quad (1.2)$$

---

<sup>2</sup> MODIS Infrared Sea Surface Temperature Algorithm

allora [3]<sup>3</sup>:

$$\Delta L_I = B_I(T_0) - L_I = \int_0^{P_0} [B_I(T_0) - B_I(T(P))] dt_I(O, P) \quad (1.3)$$

dove  $\Delta L_\lambda$  rappresenta l'errore sulla radianza introdotto dalla presenza dell'atmosfera. Questa differenza tra le radianze equivale ad una differenza tra le temperature:

$$\Delta T_I = T_0 - T_I \quad (1.4)$$

Allora, ricordando che esiste una relazione (a fissata lunghezza d'onda  $\lambda$ ) tra la temperatura e la radianza, data dalla legge di Planck, si può scrivere che la radianza  $B_\lambda(T_0)$  è:

$$B_I(T_0) = \left. \frac{\partial B_I(T_0)}{\partial T} \right|_{T=T_0} (T_I - T_0) \quad (1.5)$$

da cui:

$$\Delta T_I = - \frac{\Delta L_I}{\left. \partial B_I(T) / \partial T \right|_{T=T_0}} \quad (1.6)$$

Si osservi che per uno strato di molecole gassose otticamente sottile la trasmittività è proporzionale al coefficiente d'assorbimento alla lunghezza d'onda  $\lambda$ ,  $k_\lambda$ . Indicato con  $U(P)$  il cammino ottico delle molecole del gas dallo strato superiore dell'atmosfera sino al livello avente pressione  $P$  si ha:

$$dt_I \cong -k_I dU(P) \quad (1.7)$$

Si assuma, inoltre, che, in ogni banda, la funzione di Planck che esprime la radianza in uno strato di atmosfera che ha pressione  $P$  rispetto allo strato superiore, sia

---

<sup>3</sup> Deschamps, Phulphin, *Boundary Layer Meteor.* **18** pag. 131-143 (1980)

sviluppiabile in serie di Taylor arrestato al secondo ordine intorno al punto  $T_0$  (Tale approssimazione è lecita se si considerano strati gassosi di atmosfera otticamente sottili):

$$B_I [T(P)] = B_I (T_0) + \left( \frac{\partial B_I}{\partial T} \right)_{T=T_0} [T(P) - T_0] \quad (1.8)$$

Dalla (1.8) si ricava:

$$B_I (T_0) - B_I (T(P)) = \left( \frac{\partial B_I}{\partial T} \right)_{T=T_0} [T_0 - T(P)] \quad (1.9)$$

Inoltre, dalla (1.6) si ha:

$$\Delta L_I = -\Delta T_I \left. \frac{\partial B_I (T)}{\partial T} \right|_{T=T_0} \quad (1.10)$$

Sostituendo la (1.7), la (1.9) e la (1.10) nella (1.3) si ha:

$$-\left. \frac{\partial B_I (T)}{\partial T} \right|_{T=T_0} \Delta T_I = -k_I \int_0^{P_0} \left. \frac{\partial B_I (T)}{\partial T} \right|_{T=T_0} [T_0 - T(P)] dU(P) \quad (1.11)$$

Poiché la radianza  $B_\lambda(T)$  e la sua derivata parziale non dipendono dal cammino ottico delle molecole gassose presenti in atmosfera, si può scrivere:

$$\Delta T_I = k_I \int_0^{P_0} [T_0 - T(P)] dU(P) \quad (1.12)$$

L'errore sulla temperatura  $\Delta T_\lambda$  dipende ora soltanto dal coefficiente d'assorbimento  $k_\lambda$  delle molecole gassose presenti in atmosfera. Quindi, se si considerano due bande spettrali, si hanno due equazioni lineari, con diversi coefficienti d'assorbimento, da risolvere contemporaneamente.

Allora, per un sistema a due bande, come quello che sarà utilizzato in questo lavoro, si può rappresentare la SST come combinazione delle temperature  $T_1$  e  $T_2$ , dette *temperature di brillantezza*, calcolate, per ciascuna banda, invertendo la legge di Planck:

$$T_s = a_0 + a_1 T_1 + a_2 T_2 \quad (1.13)$$

dove  $a_0$  è un coefficiente che tiene conto delle attenuazioni del segnale che non dipendono dalla lunghezza d'onda,  $a_1$  e  $a_2$  sono delle costanti calcolate teoricamente o empiricamente come  $a_0$ , e dipendono dall'assorbimento ottico (sono proporzionali a  $k_\lambda$ ) [2]<sup>4</sup>.

### 1.3 Algoritmi di calcolo della SST: stato dell'arte

Attualmente esistono diversi algoritmi di calcolo della SST usando dati satellitari.

Negli anni, molti scienziati hanno ideato algoritmi nuovi o ne hanno modificato alcuni già esistenti cercando di migliorare via via l'accuratezza del calcolo.

Oggi non esiste ancora un algoritmo standard in grado di stimare la SST a causa della disomogeneità degli strati atmosferici, dell'imperfezione di algoritmi esistenti per la correzione di fenomeni nuvolosi ecc.

Inoltre, è tuttora una questione aperta lo sviluppo di un algoritmo in grado di stimare la SST anche nelle acque non pure, le cosiddette *acque di caso due*, presenti soprattutto sulle coste. Infatti, la radiazione elettromagnetica riflessa da acque costiere verso il satellite è contaminata da quella riflessa dalla terra, di solito un ordine di grandezza superiore rispetto a quella riflessa dall'acqua. In questo lavoro si approfondirà proprio tale aspetto del problema.

Il fatto che ci siano dei problemi di accuratezza negli algoritmi di calcolo della SST, rende necessario un processo di calibrazione dei modelli implementati e una successiva validazione degli stessi utilizzando delle misure in sito.

---

<sup>4</sup> MODIS Infrared Sea Surface Temperature Algorithm



Il primo effetto di disturbo che si cerca di correggere nello sviluppo di tali algoritmi, è quello atmosferico.

Si ricordi che nelle bande del TIR, il principale effetto di disturbo atmosferico è dato dall'assorbimento del vapor d'acqua.



**Figura 1.1:** Spettro di assorbimento del vapor d'acqua.

Si noti che la trasmissività atmosferica sulle bande Modis dell'infrarosso lontano (31-32) è simile (si veda la figura 1.1), perciò si tende a costruire algoritmi che considerino la differenza tra queste bande, come già detto nel paragrafo 1.1 [4]<sup>5</sup>, in modo da rendere trascurabile il contributo atmosferico.

Il più semplice di tali algoritmi assume, che per piccole quantità di vapor d'acqua, l'atmosfera è otticamente sottile che la differenza tra la temperatura misurata in una qualsiasi delle bande dell'infrarosso e la temperatura superficiale vera può essere parametrizzata come una semplice funzione della differenza tra le temperature misurate nelle due bande con differenti trasmissività atmosferiche.

Deschamps e Phulpin [3]<sup>6</sup> hanno fornito il seguente algoritmo di calcolo per la SST utilizzando la tecnica dello split window:

$$T_s = a + b T_i + g (T_i - T_j) \quad (1.14)$$

dove  $\alpha, \beta, \gamma$  sono dei coefficienti analoghi ai coefficienti  $a_0, a_1, a_2$  introdotti nel paragrafo 1.2 e anch'essi calcolabili empiricamente;  $T_i, T_j$  sono le temperature di brillantezza, in una data posizione, calcolate, per le bande in esame, dalle radianze misurate da satellite.

<sup>5</sup> Anding, Kauth, Remote Sensing Environment **1**, pag. 217-220 (1970)

<sup>6</sup> Deschamps, Phulpin, *Boundary Layer Meteor.* **18** pag. 131-143 (1980)

Qualche anno più tardi Llewellyn-Jones et al. [5]<sup>7</sup> hanno osservato che l'algoritmo di Deschamps e Phulpin [3] non teneva conto degli errori dovuti a grandi angoli di scansione da parte del sensore e introdussero un termine di correzione all'algoritmo esistente che avrebbe tenuto conto di quest'effetto:

$$T_s = \mathbf{a}' + \mathbf{b}'T_i + \mathbf{g}'(T_i - T_j) + \mathbf{d}(1 - \sec(J)) \quad (1.15)$$

dove  $\vartheta$  è l'angolo zenitale di acquisizione del sensore e  $\delta$  un coefficiente addizionale che dipende da  $\vartheta$ . Questo termine aggiuntivo riduce gli errori dovuti a grandi  $\vartheta$  di un grado Kelvin, infatti, per grandi angoli zenitali del sensore la  $\sec\vartheta = 1/\cos\vartheta$  è piccola, mentre per piccoli valori di  $\vartheta$  l'ultimo termine è nullo. Tale algoritmo è stato in seguito modificato tenendo conto della correzione atmosferica anche nel fattore di correzione per grandi angoli di scansione:

$$T_s = \mathbf{a}' + \mathbf{b}'T_i + \mathbf{g}'(T_i - T_j) + \mathbf{d}(1 - \sec(J)) (T_i - T_j) \quad (1.16)$$

È importante osservare che i coefficienti che compaiono nelle espressioni dell'algoritmo per determinare la SST sono diversi durante il giorno e durante la notte, quindi se si utilizzano dati satellitari diurni e notturni è necessario fare una distinzione fra gli algoritmi.

Altri esempi di algoritmi in grado di calcolare la SST da misure da satellite necessitano di informazioni esterne, dette *ancillary data*, che non sempre sono disponibili. Uno fra questi è quello commentato da Kilpatrick in [6]<sup>8</sup> che utilizza le bande dell'infrarosso di Modis 31 e 32 e la temperatura dell'aria per migliorare l'accuratezza nella correzione atmosferica. Esso è una modifica del precedente e assegna un valore diverso ai coefficienti dell'espressione usata per calcolare la SST secondo il valore della differenza delle temperature di brillantezza in banda 31 e 32.

---

<sup>7</sup> Llewellyn-Jones, Minnett, Saunders, *Quart. J. R. Met. Soc.* **110**, 613-631 (1984)

<sup>8</sup> Kilpatrick, [http://daac.gsfc.gov/MODIS/FAQ/A\\_sci\\_L1B\\_SST.html](http://daac.gsfc.gov/MODIS/FAQ/A_sci_L1B_SST.html) (2003)

Supponendo di considerare soltanto acquisizioni diurne, la sea surface temperature si può esprimere nel modo seguente:

$$SST = k_1 + k_2 T_{31} + k_3 (T_{31} - T_{32}) T_{sst} + k_4 (T_{31} - T_{32})(\sec J - 1) \quad (1.17)$$

I coefficienti  $k_i$  assumono valori diversi per  $T_{31} - T_{32} < 0.5$  e per  $T_{31} - T_{32} > 0.9$ .

Per  $0.5 < T_{31} - T_{32} < 0.9$  la SST risulta da una combinazione delle SST calcolate per i due casi.

Detta  $SST_a$  la SST calcolata nel caso in cui  $T_{31} - T_{32} < 0.5$  e  $SST_b$  la SST calcolata nel caso in cui  $T_{31} - T_{32} > 0.9$  si ha che, per  $0.5 < T_{31} - T_{32} < 0.9$ :

$$SST = w_1 SST_a + w_2 SST_b \quad (1.18)$$

con:

$$w_1 = \frac{2}{5}(0.9 - (T_{31} - T_{32})) \quad (1.19)$$

$$w_2 = 1 - w_1$$

Si osservi che nella (1.17) compare il termine  $T_{sst}$  che indica la temperatura dell'aria. Questa informazione non è sempre disponibile. In prima approssimazione, si può sostituire  $T_{sst}$  con la temperatura di brillanza calcolata dalla radianza misurata in banda 20 invertendo la formula di Planck.

I coefficienti  $k_i$ , calcolati empiricamente utilizzando un dataset tarato su tutte le possibili condizioni atmosferiche, sono elencati in tabella 1.2 sia per  $T_{31} - T_{32} < 0.5$  che per  $T_{31} - T_{32} > 0.9$ .

|   | <b>k<sub>1</sub></b> | <b>k<sub>2</sub></b> | <b>k<sub>3</sub></b> | <b>k<sub>4</sub></b> |
|---|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| <b>T<sub>31</sub> - T<sub>32</sub> &lt; 0.5</b> | 1.1520               | 0.9600               | 0.1510               | 2.0210               |
| <b>T<sub>31</sub> - T<sub>32</sub> &gt; 0.9</b> | 2.1330               | 0.9260               | 0.1250               | 1.1980               |

**Tabella 1.2:** Coefficienti per il calcolo della SST con l'algoritmo che utilizza la  $T_{sst}$ .

Un altro disturbo da correggere, di cui non si è ancora parlato, è la presenza di sun glint<sup>9</sup>.

In questa trattazione si accennerà soltanto alla correzione di tale disturbo perché non affrontata nel presente lavoro e piuttosto complicata. Il fenomeno del sun glint è, infatti, fortemente influenzato dal campo di vento presente. Tale informazione, però, non è acquisita da Modis e fa parte di quegli ancillary data di cui si è parlato in precedenza.

Il team di Modis ha in ogni caso realizzato un prodotto, per ciascun'acquisizione, che individua i pixel di un'immagine colpiti da tal effetto. Questo permette di eliminare i pixel corrotti.

Un altro problema da affrontare quando si vuole calcolare la SST è l'inevitabile presenza di nuvole. Esso sarà affrontato con più dettaglio nel capitolo seguente.

## **1.4 Problemi nella validazione degli algoritmi che stimano la SST da misure da satellite**

Nel paragrafo 1.3 è stato detto che gli algoritmi che stimano la SST dalle misure da satellite hanno bisogno di un processo di calibrazione per tarare i coefficienti di calcolo della SST e di validazione per verificarne il funzionamento.

L'approccio convenzionale per validare gli algoritmi di calcolo della SST è il confronto con misure di temperatura in sito. Questo metodo, però, introduce degli errori derivanti dal fatto che le misure di temperatura sono misure di volume, fatte di solito alla profondità di circa 1m, mentre il contributo alla SST calcolata con acquisizioni da satellite, proviene da uno strato superficiale di acqua, detto *skin layer*, di circa 1mm. Infatti, la radiazione elettromagnetica proveniente da satellite viene in gran parte assorbita al di sotto di questa profondità e non vi è radiazione proveniente dal fondo che raggiunge il satellite.

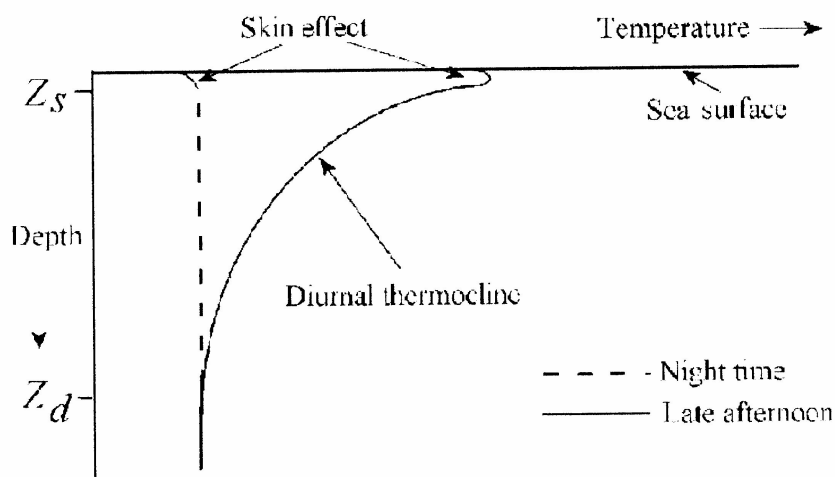
---

<sup>9</sup> Il sun glint è un fenomeno di riflessione speculare della radiazione solare che avviene quando l'angolo zenitale d'acquisizione del sensore e l'angolo zenitale del Sole sono uguali e i due angoli azimutali del Sole e del sensore differiscono di 180 gradi. In presenza di quest'effetto il sensore è accecato dall'elevata intensità della radiazione che lo raggiunge e di conseguenza la misura è alterata.

Ciò fa sì che s'introducano degli errori di tipo sistematico dovuti all'esistenza di un gradiente di temperatura tra lo skin layer e gli strati più profondi (si veda la fig. 1.2).

In questo momento non sono note precise relazioni tra temperatura superficiale e temperatura di volume perciò si tiene conto dell'errore negli algoritmi di stima in modo statistico.

I gradienti di temperatura sotto superficiale possono derivare da due processi: l'assorbimento di radiazione proveniente dal Sole e il successivo scambio di calore con l'atmosfera. In condizioni di basse velocità del vento il calore generato dall'assorbimento della radiazione solare non raggiunge lo strato superficiale, ma causa una stratificazione termica e differenze di temperatura tra lo strato superiore dell'oceano e lo strato di acqua sottostante. Questi gradienti di temperatura dipendono fortemente dall'ora del giorno e dalla copertura nuvolosa presente (fattori che regolano l'isolamento) e dalla velocità del vento che regola il rimescolamento delle acque. Lo strato superficiale dell'oceano, è di solito più freddo di quelli sottostanti perché il trasferimento di calore è diretto dall'oceano all'atmosfera; il flusso di calore è di solito accompagnato da conduzione molecolare all'interfaccia acqua-aria e questo è associato con un gradiente di temperatura superficiale.



**Figura 1.2:** Grafico del gradiente di temperatura verticale dalla superficie dell'oceano.

La situazione tipica è rappresentata in figura 1.2. Si nota che il profilo di temperatura durante la notte è pressoché iso-termico a causa di un rimescolamento turbolento. Durante il giorno, invece, il profilo cresce in modo quasi esponenziale e raggiunge il suo massimo nel tardo pomeriggio. Questo per giornate senza vento e uniformemente chiare.

Può accadere, però, che durante il giorno vi siano delle condizioni per cui la temperatura superficiale sia più calda della temperatura di volume misurata decine di centimetri più sotto, ma questo non significa necessariamente che il gradiente verticale di temperatura ha cambiato segno.

Come si può intuire il profilo di temperatura appena descritto e rappresentato in figura 1.2, è piuttosto idealistico. Nella realtà esso è molto più variabile; questo sfocia in una differenza tra temperatura stimata da satellite e temperatura misurata, fortemente dipendente dalla profondità a cui è effettuata la misura [7,8]<sup>10</sup>. Differenze tra temperatura stimata e temperatura misurata di poco più di un grado possono considerarsi un buon risultato.

---

<sup>10</sup> Wick, Satellite and skin layers effects on the accuracy of sea surface temperature measurements Minnett, *International Journal of Remote Sensing* **24**, pag. 5033-5047 (2003)

## Capitolo 2

# Come discriminare il cielo sereno dal cielo nuvoloso

Nel capitolo precedente si è parlato dei problemi degli algoritmi di stima della SST. In questo capitolo si descrive in dettaglio la catena di elaborazione del segnale per correggere le nuvole perché utilizzata in questo lavoro.

Il canale 36 di Modis offre l'opportunità, per approcci multispettrali, di rilevare le nuvole. Inoltre, test sull'uniformità spaziale e temporale forniscono una conferma di condizioni di cielo chiaro o nuvoloso.

Il team scientifico di Modis ha implementato un prodotto, molto elaborato, detto *cloud mask*, in grado non solo di rilevare le nuvole, ma persino di distinguerne i vari tipi.

### 2.1 Implementazione della cloud mask

Le nuvole sono in genere caratterizzate da una riflettanza più elevata e temperatura più bassa della sottostante superficie terrestre. Questo potrebbe far pensare che per rilevare la presenza di fenomeni nuvolosi basterebbe utilizzare delle soglie nelle finestre dell'infrarosso e del visibile. Esistono, però delle condizioni di superficie, quali ad esempio neve e ghiaccio perciò tale caratterizzazione è inappropriata. Non

solo. Alcuni tipi di nuvole, quali ad esempio cirri sottili, quelle a strati bassi, piccoli cumuli non si riescono a rilevare con questo semplice metodo poiché non vi è abbastanza contrasto con la radianza proveniente dalla superficie. Da qui la necessità di implementare la cloud mask.

La cloud mask di Modis indica se una data vista della superficie terrestre è ostruita oppure no da nuvole o da aerosol otticamente spesso. Essa è generata a risoluzioni di 1km e di 250m.

Le informazioni in ingresso all'algoritmo di cloud mask sono rappresentate dai dati di radianza già calibrata di livello L1B. Inoltre essa è determinata soltanto per dati che hanno un'integrità radiometrica in ciascuna delle bande 1, 2, 4, 5, 6, 7, 17, 18, 19, 20, 22, 26, 27, 28, 29, 31, 32, 33, 35.

Il team scientifico di Modis si è ispirato, nell'implementazione dell'algoritmo di cloud mask, all'algoritmo ideato nel 1993 da Rossow e Garder [9]<sup>11</sup>, detto ISCCP, il quale si basa sulla premessa che le radianze osservate nel visibile e infrarosso riflettono soltanto due tipi di condizioni, chiaro e nuvoloso, e che gli intervalli di radianza e le loro variabilità associate con queste due condizioni, non si sovrappongono mai. Come si può intuire si tratta di un algoritmo a soglia in cui un pixel è classificato come nuvoloso se almeno un valore di radianza, relativo ad una delle bande enunciate sopra, è più grande della soglia stabilita per condizioni di cielo chiaro. Tale algoritmo è costruito in modo tale da essere *cloud conservative*. Esso minimizza la rilevazione di false nuvole, ma non è in grado di rivelare quelle nuvole che fanno sembrare il cielo in ogni caso chiaro.

Da quando Rossow e Garder [9]<sup>12</sup> hanno implementato l'algoritmo ISCCP, molti altri scienziati hanno modificato tale algoritmo o ne hanno sviluppato di nuovi adatti a rivelare le nuvole su immagini acquisite da satelliti specifici. Essi, inoltre, hanno cercato di migliorare l'accuratezza della cloud mask aumentando il numero di test da eseguire sulle radianze per distinguere, ad esempio, nuvole aventi un'alta trasmissività da nuvole opache [10]<sup>13</sup> oppure combinando test già fatti in precedenza [11]<sup>14</sup>.

---

<sup>11</sup> Rossow, Gardner, ISCCP6 2341-2369 (1993)

<sup>12</sup> Rossow, Gardner, ISCCP6 2341-2369 (1993)

<sup>13</sup> Wylie, Menzel, Woolf, Strabala, Four years of global cirrus cloud statistics using HIRS (1994)

<sup>14</sup> Frey, Ackerman, Soden, Climate parameters from satellite spectral measurements (1955)



## 2.2 Input ed output dell'algoritmo di cloud mask

Come già detto nel paragrafo precedente, le informazioni in input all'algoritmo della cloud mask sono rappresentate dalle radianze nelle bande specificate. In più la cloud mask richiede parecchi dati ancillari come l'angolo zenitale e azimutale del Sole, l'angolo di vista del sensore, la mappa di terra e acqua ad un km di risoluzione, l'elevazione dal livello del mare ecc.

Queste informazioni sono in ogni caso state inserite nei prodotti di geolocalizzazione Modis (MOD03).

L'output della cloud mask Modis è una parola a 48 bit di cui i primi due byte sono i più importanti (ovvero i primi 16 bit). La maschera conserva l'informazione riguardante i pixel di terra o di mare, ed è importante per molte applicazioni diverse di cui alcune hanno bisogno di condizioni piuttosto restrittive sulle nuvole, altre meno. Ad esempio alcuni algoritmi possono richiedere una correzione che tiene conto degli effetti radiativi di una nuvola sottile, mentre altri eviteranno tutte le scene contaminate da nuvole. Inoltre alcuni algoritmi possono usare bande spettrali che sono più sensibili di altre alla presenza di nuvole. Per questa ragione, l'output della cloud mask comprende i risultati di tutti i test particolari di rilevazione di nuvole.

Bisogna osservare, inoltre, che il confine tra pixel nuvoloso e pixel chiaro è a volte ambiguo. Un pixel può apparire, ad esempio, parzialmente chiaro e parzialmente nuvoloso, oppure un pixel può apparire nuvoloso ad una data lunghezza d'onda e libero da nuvole in un'altra.

Per tener conto di un'ampia varietà di applicazioni la maschera è più di una semplice decisione sì/no, ma comprende quattro livelli di confidenza per decidere se un pixel è pulito o coperto da nuvole. L'informazione di questo tipo si trova nei bit<sup>15</sup> 1 e 2 ed è il risultato di diversi test spettrali di cui si parlerà in dettaglio più avanti giacché importanti per quest'applicazione. Essi fanno parte degli output all'algoritmo della cloud mask.

---

<sup>15</sup> Si osservi che i bit sono ordinati da destra a sinistra. Il bit zero, che è quello più a destra, è il meno significativo.

### **2.2.1 Input all'algoritmo**

Si esaminano ora i bit di input, necessari all'implementazione della maschera di nuvole, rappresentati dai bit 3, 4, 5, 6, 7 i quali contengono dei flag necessari per processare il dato. Si tratta di dati ancillari, di solito inseriti nei prodotti di geolocalizzazione di Modis oppure forniti direttamente da qualche ente esterno.

Il bit 3 fornisce la distinzione giorno/notte. Se il suo valore è pari ad 1, devono essere applicati algoritmi giornalieri al pixel in considerazione.

Il bit 4 stabilisce un flag per il sun glint, mentre il bit 5 identifica la presenza di neve o ghiaccio. Se esso ha valore zero, allora l'algoritmo di cloud mask trova la presenza di neve. Il significato di questo bit è importante in quelle zone affette da precipitazioni nevose, perché in presenza di neve, alcuni test sull'identificazione di nuvole si applicano in modo diverso.

I bit 6 e 7 riescono a distinguere se la zona considerata appartiene alla terra o al mare. Esistono 4 categorie considerate (da qui la necessità di raccogliere l'informazione in due bit): terra, acqua, deserto, costa. Alcune volte un pixel può essere classificato come appartenente a due classi diverse come ad esempio costa, terra. In questi casi si assegna al pixel la caratteristica più importante per il processo di cloud mask. L'ordine di importanza stabilito è: costa, deserto, terra, acqua.

### **2.2.2 Output all'algoritmo**

In questa sezione si dà una breve descrizione del significato dei bit di output rappresentati dai bit 0,1,2 e dai bit che vanno dall'8 al 47.

Il bit zero, di cui si è accennato in precedenza, rappresenta un flag di esecuzione ovvero indica le condizioni per cui l'algoritmo di cloud mask deve essere eseguito.

Le condizioni per cui l'algoritmo non è eseguito sono date da valori di radianza non validi ad esempio derivanti da cattiva acquisizione, oppure da dati di geolocalizzazione non validi o mancanti.

Uno schema del significato dei principali bit dell'algoritmo di cloud mask è riportato in tabella 2.1.

| <b>Numero di bit</b> | <b>Descrizione</b> | <b>Risultato</b>  |
|----------------------|--------------------|---|
| 0                    | Flag di cloud mask | 0 = non determinato<br>1 = determinato                            |
| 1-2                  | Flag di confidenza | 00 = nuvoloso<br>01 = incerto<br>10 = prob. Chiaro<br>11 = chiaro |
| 3                    | Flag giorno/notte  | 0 = notte/1 = giorno  |
| 4                    | Flag sun glint     | 0 = si/1 = no   |
| 5                    | Flag neve/ghiaccio | 0 = si/ 1 = no  |
| 6-7                  | Flag terra/acqua   | 00 = acqua<br>01 = costa<br>10 = deserto<br>11 = terra            |

**Tabella 2.1: Principali bit per l'algoritmo di cloud mask**

I bit 1 e 2 effettuano test spettrali stabilendo un intervallo di confidenza per ogni banda spettrale all'interno del quale il pixel ha una determinata probabilità di essere chiaro. È così possibile stabilire se un determinato pixel è chiaro o nuvoloso con un certo livello di confidenza. Questo approccio quantifica l'affidabilità della cloud mask implementata per un dato pixel.

Gli altri bit danno delle informazioni addizionali. Essi sono in grado di distinguere una nuvola da fumo dovuto ad incendi di foreste, da tempeste di sabbia, da aerosol (bit 8) oppure riescono ad identificare differenti tipi di nuvole (bit 9, 10, 11).

Inoltre, sono in grado di fornire informazioni particolari, importanti per alcune applicazioni, riguardanti test di consistenza ad 1km di risoluzione oppure a 500m, 250m (bit 12-47) [12]<sup>16</sup>.

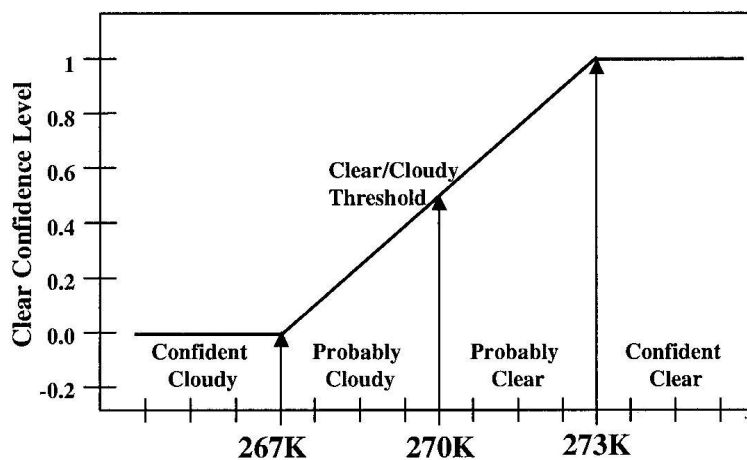
---

<sup>16</sup> Ackerman, Strafala, Menzel, Frey, Moeller, Gumley, Baum, Seeman, Zhang, MODIS Algorithm Theoretical Document (2002)

## 2.3 I test principali della cloud mask

La gran parte dei test che cercano di identificare le nuvole e i vari tipi di nuvole, sono test a soglia sulla temperatura di brillanza a diverse lunghezze d'onda. Esistono però anche dei test che pongono una soglia sulla riflettanza o sui rapporti di riflettanza in diverse bande. Si sceglie l'uno o l'altro tipo di test o entrambi secondo l'informazione che si vuole trarre.

Sono state sviluppate parecchie soglie nell'infrarosso e parecchie tecniche che sfruttano la differenza di temperature di brillanza. Questi algoritmi sono molto efficienti per nuvole fredde sull'acqua, ma devono essere utilizzati con cautela in altre situazioni. Il primo test nell'infrarosso da applicare sugli oceani è molto semplice. Si assume che in mare aperto il pixel in esame non si può considerare chiaro quando la temperatura di brillanza in banda 31 ( $\approx 11\mu\text{m}$ ) è inferiore a 270 gradi Kelvin.



*Figura 2.1:* Soglie per il test di nuvole fredde nell'IR

Come si può notare in fig. 2.1, quando la temperatura di brillanza è inferiore a 267 gradi kelvin il pixel è considerato nuvoloso con un alto livello di confidenza, quando è tra 267-270 K il pixel si considera probabilmente nuvoloso, quando è tra 270-273 K probabilmente chiaro, quando è superiore a 273 K chiaro con un elevato livello di confidenza.

Mascherare le nuvole sulla superficie terrestre utilizzando le bande dell'infrarosso è un processo più complicato a causa dell'elevata variabilità dell'emissione superficiale. Test sull'identificazione di nuvole sulla terra si fanno utilizzando differenze di temperatura di brillantezza tra bande diverse dell'infrarosso. Sono ampiamente usate le differenze tra temperature di brillantezza nelle bande 31 e 32 del Modis.

Ad esempio, Saunders e Kriebel [13]<sup>17</sup> usarono la differenza  $T_{31}-T_{32}$  per rivelare cirri. Si è visto che le differenze di temperatura di brillantezza sono più grandi su nuvole sottili che su cielo chiaro. In tal caso si utilizzano delle soglie dinamiche, funzioni dell'angolo zenitale del satellite e della temperatura di brillantezza in banda 31.

Un altro test sui tipi di nuvole è stato fatto da Inoue [14]<sup>18</sup>. Egli è stato in grado di separare il cielo chiaro dal cielo nuvoloso paragonando  $T_{31}-T_{32}$  con  $T_{31}$ . Esistono, inoltre, come è già stato detto all'inizio del paragrafo, dei test di identificazione di nuvole basati sulla riflettanza in cui si utilizzano di solito le bande del visibile ad una risoluzione di 250m (0.65 $\mu$ m e 0.85 $\mu$ m). La loro forza è quella di riuscire a discriminare nuvole brillanti su superfici scure, sono meno adatti, quindi, a zone in cui vi è presenza di neve o ghiaccio. Il canale a lunghezza d'onda di 0.65 $\mu$ m è usato sulla terra, mentre quello a 0.85  $\mu$ m si usa sugli oceani e in zone desertiche. Le soglie nominali per questo tipo di test sono riportate in tabella 2.2.

| <b><math>\lambda = 0.65 \mu\text{m}</math></b> |                 |                               |               |
|--|-----------------|-------------------------------|---------------|
| <b>Tipo di superficie</b>                      | <b>Nuvoloso</b> | <b>Soglia chiaro/nuvoloso</b> | <b>Chiaro</b> |
| terra/costa/neve (giorno)                      | 0.22            | 0.18                          | 0.14          |
| <b><math>\lambda = 0.85 \mu\text{m}</math></b> |                 |                               |               |
| <b>Tipo di superficie</b>                      | <b>Nuvoloso</b> | <b>Soglia chiaro/nuvoloso</b> | <b>Chiaro</b> |
| oceano (giorno)                                | 0.065           | 0.0558                        | 0.045         |
| deserto (giorno)                               | 0.34            | 0.30                          | 0.26          |

**Tabella 2.2: Soglie per il test di identificazione delle nuvole a  $\lambda = 0.65 \mu\text{m}$  e a  $\lambda = 0.85 \mu\text{m}$**

<sup>17</sup> Saunders, Kriebel, An improved method for detecting clear sky and cloudy radiances from AVHRR data (1988)

<sup>18</sup> A cloud type classification with NOAA7 split window measurements (1987)

### **2.3.1 Procedura di cloud mask implementata**

L'algoritmo Modis di cloud mask, descritto in questo capitolo ed applicato al lavoro in esame, non ha dato buoni risultati. Esso, infatti, ha scartato tutti i pixel costieri di solito contaminati dalla presenza della terra. Essendo lo scopo di questo lavoro valutare la sea surface temperature in prossimità delle coste, si è implementato un algoritmo di cloud mask mirato all'applicazione che si intendeva realizzare.

In particolare, sono stati eliminati i pixel la cui temperatura di brillanza in una delle due bande scelte fosse inferiore a 273 gradi Kelvin, quei pixel affetti da saturazione<sup>19</sup> anche in una sola delle bande emissive e quei pixel il cui valore di riflettanza nelle bande a 250m fosse superiore a 0.065 perché in tal caso vi è un'elevata probabilità che si tratti di pixel nuvolosi.

---

<sup>19</sup> Per saturazione di un pixel in una data banda si intende che il valore di radianza del pixel è pari al livello radiometrico massimo. Nel caso di immagini Modis, che sono a 16 bit, tale valore è 65536.

## Capitolo 3

### Cenni di Sistemi Informativi Geografici (GIS)

#### 3.1 Cos'è un GIS?

Un sistema informativo geografico (**Geographical Information System, GIS**) è un sistema informativo computerizzato che permette l'acquisizione, la registrazione, l'analisi, la visualizzazione e la restituzione di informazioni derivanti da dati geografici (geo-referenziati).

Il GIS può essere visto come una forma di DBMS (Database Management System, Sistema di gestione di basi di dati) capace di gestire le posizioni degli "elementi" sul territorio, che si integra con delle componenti software di interrogazione e visualizzazione. Spesso si parla indifferentemente di sistemi informativi geografici e di sistemi informativi territoriali (SIT). Le due definizioni però non sono affatto equivalenti nella misura in cui la prima (GIS) fa esplicito riferimento alla rappresentazione geografica di informazioni, mentre la seconda (SIT), facendo riferimento al territorio, può anche prescindere dall'aspetto meramente cartografico.

*Geografico* è, infatti, ciò che attiene alla rappresentazione grafica della Terra e della superficie terrestre a più livelli di dettaglio.

*Territoriale* è, invece, ciò che attiene al territorio che, a sua volta, è un concetto giuridico che identifica una porzione della superficie terrestre delimitata da confini amministrativi. È evidente che, da questo punto di vista, un sistema informativo

territoriale non è necessariamente anche un sistema informativo geografico, mentre di solito è vero il contrario.

In generale, i sistemi informativi geografici sono utilizzati da tutti coloro che hanno bisogno di visualizzare sul territorio qualsiasi tipo di informazione.

### **3.1.1 Perché usare un GIS**

Esistono essenzialmente tre motivi per usare un sistema GIS:

- I GIS sono relazionati ad altre applicazioni di database, ma con un'importante differenza. Tutte le informazioni in un GIS sono collegate ad un riferimento spaziale. Altri database possono contenere informazioni di localizzazione (come indirizzi o codici postali), ma un database GIS usa la geo-referenziazione come mezzo primario di accesso alle informazioni.
- Il GIS integra tecnologia, nel senso che, all'interno di un GIS, sono offerte tutte insieme le capacità di analizzare foto aeree e immagini satellitari, creare modelli statistici o disegnare mappe.
- Il GIS, con il suo gruppo di funzioni, deve essere visto come un processo che solo come software o hardware. Il modo in cui i dati sono introdotti, memorizzati ed analizzati all'interno di un GIS, devono rispecchiare il modo in cui le informazioni saranno utilizzate per una specifica ricerca o un supporto alle decisioni.

Un tipico sistema GIS incorpora differenti database ed è capace di processare i dati sia in modalità *raster* che *vettoriale*. È questa possibilità di combinare o dividere in differenti livelli (*layer*) i dati spaziali o planimetrici (generalmente in formato vettoriale) che dà ai GIS potenza e versatilità.

Ad esempio un GIS può essere capace di combinare dati geografici ottenuti da mappe convenzionali con dati derivati da telerilevamento satellitare. Il risultato è la combinazione dell'accuratezza aggiornata del suolo ottenuta dalla "scena" satellitare.



La sovrapposizione di dati catastali può fornire informazioni anche sulla proprietà e sullo stato legale.

## 3.2 Modelli di dati

Per la rappresentazione in un sistema informativo geografico occorre formalizzare un modello rappresentativo che si adatti ai fenomeni reali. Nel GIS esistono tre tipologie di informazioni [15]<sup>20</sup>:

- **Informazioni Geometriche**: relative alla rappresentazione cartografica degli oggetti rappresentati, quali la forma (punto, linea poligono), la dimensione e la posizione geografica.
- **Informazioni Topologiche**: riferite alle relazioni reciproche tra gli oggetti (connessione, adiacenza, inclusione ecc...).
- **Informazioni Informative**: riguardanti i dati (numerici, testuali ecc...) associati ad ogni oggetto.

Il GIS prevede la gestione di queste informazioni in un database relazionale. L'aspetto che caratterizza il GIS è quello geometrico: esso memorizza la posizione del dato impiegando un sistema di proiezione reale che definisce la posizione geografica dell'oggetto. Il GIS è in grado di gestire contemporaneamente i dati provenienti da diversi sistemi di proiezione e di riferimento.

A differenza della cartografia su carta, la scala è un parametro di qualità e non di visualizzazione del dato. Il valore della scala esprime le cifre significative, da considerare valide, delle coordinate di geo-riferimento.

---

<sup>20</sup> GESp S.r.l. Introduzione ai Sistemi Informativi Geografici

### 3.2.1 Tipologie di dati geografici

I dati geo-riferiti sono di due tipologie principali:

- dati **vettoriali**
- dati **raster**

Un *sistema vettoriale* visualizza i dati grafici come punti, linee o curve, o aree con attributi. Le informazioni di punti, linee, poligoni, sono codificate e memorizzate come coordinate bidimensionali.

Gli algoritmi di calcolo delle coordinate definiscono i punti in un sistema vettoriale. Linee ed archi sono una serie di punti ordinati. Aree o poligoni sono anch'essi memorizzati come liste ordinate di punti, ma con la coincidenza del punto iniziale e di quello finale nello stesso nodo si ottiene un'area chiusa e definita. Da un punto di vista prettamente geometrico si può assumere che il punto di applicazione del generico vettore coincide con il primo vertice di ciascun segmento; la direzione coincide con quella della retta contenente il segmento; il verso è quello che parte dal punto di applicazione e si dirige al vertice opposto.

I sistemi vettoriali sono capaci di risoluzioni molto alte (anche dell'ordine dei decimi di mm) e l'output grafico è molto simile alle mappe disegnate a mano. Questo tipo di sistema lavora bene con azimuth, distanze e punti, ma richiede complesse strutture di dati ed è meno compatibile con dati da telerilevamento. I dati vettoriali richiedono meno memoria di massa e riescono più facilmente a mantenere le relazioni topologiche.

Un *sistema raster* visualizza e memorizza dati grafici utilizzando una matrice o griglia di celle. È costituito da un'immagine georiferita con una collocazione spaziale definita.

Un unico sistema di coordinate rappresenta ogni pixel o all'angolo o al centroide ed ogni cella o pixel ha dati discreti associati.

Generalmente i dati raster richiedono meno processamento dei dati vettoriali, ma richiedono molta più memoria di massa. I sistemi di telerilevamento scanner dei satelliti memorizzano i dati in formato raster.

La cartografia raster può essere ottenuta attraverso procedimenti diversi e in particolare può risultare dalla rasterizzazione via scanner di un'immagine o carta; può essere l'immagine di una porzione di superficie terrestre trasmessa da satelliti artificiali; può essere il risultato di elaborazioni intermedie (anche miste con la cartografia vettoriale) eseguite in ambiente informativo territoriale. Nel primo caso ciascun pixel contiene un numero che esprime la tonalità di colore, mentre nel secondo caso il colore corrisponde all'energia emessa dalla superficie terrestre vista attraverso uno spettroscopio e nel terzo può assumere valori simbolici relativi alle caratteristiche del terreno, oppure essere il risultato di sovrapposizioni tematiche.

La qualità delle immagini rasterizzate si misura in termini di *risoluzione*, *compressione* e *registrazione*.

La risoluzione dipende dalla dimensione del pixel o della cella della griglia e può variare da dimensioni sub-metriche a molti chilometri.

La compressione è la capacità da parte del sistema di memorizzare le informazioni utilizzando una minore quantità di dati, con evidenti vantaggi quali il risparmio di memoria e la maggiore rapidità nell'accesso alle informazioni.

Le immagini rasterizzate non sono accompagnate da informazioni topologiche che identificano le relazioni fra i diversi elementi, a differenza di quanto avviene con la cartografia vettoriale. La tecnica di rasterizzazione è indicata per la costruzione di cartografia a scale elevate, in cui sono riportate grandi quantità di informazioni senza la necessità di rappresentarle ad un livello di dettaglio molto spinto.

## Capitolo 4

### Processing del dato satellitare

L'acquisizione da satellite di una data scena avviene mediante sensori a bordo.

I sensori, come quello utilizzato per questo lavoro (Modis), sono in grado di generare un insieme di dati bidimensionali (l'immagine) corrispondenti alla porzione di superficie terrestre osservata. Tale superficie è idealmente suddivisa in celle elementari, dette pixel (*picture element*).

Le due direzioni di riferimento dell'immagine sono generalmente costituite dalla direzione del moto della piattaforma che trasporta il sensore e dalla direzione ad essa perpendicolare, lungo la quale avviene normalmente l'acquisizione. In un pixel l'energia

elettromagnetica riflessa o emessa viene rilevata e trasdotta in un segnale elettrico ad essa proporzionale. L'ampiezza di questo segnale viene poi convertita in un numero intero, detto *digital number*, riferito al livello radiometrico massimo. Ad esempio in un sistema ad 8 bit si hanno  $2^8 = 256$  livelli radiometrici (il livello radiometrico massimo è in tal caso 256) per cui ad ogni livello di energia raccolta si può far corrispondere un numero che va da 0 a 255. L'immagine così digitalizzata può essere più facilmente elaborata da un calcolatore. In questa sezione si descrive il processo di elaborazione di un'immagine digitale effettuato per questo lavoro di stage a partire dal prodotto raw (ovvero così come viene acquisito) fino al prodotto finale.

## 4.1 Calcolo della SST dalle radianze di livello L1B

Per il calcolo della SST utilizzando l'algoritmo (1.16) descritto nel cap.1, è necessario estrarre le radianze raw dalle immagini Modis da elaborare. Le immagini Modis distribuite dalla Nasa, hanno un formato di tipo piramidale avente estensione .hdf (*hierarchical data format*). Esse hanno dimensione pari a 1354x2030x36, dove 36 sono le bande di Modis. È stata acquisita, quindi, un'immagine per ogni banda di dimensioni pari a 1354x2030.

In questo lavoro, si è scelto di utilizzare le bande del TIR 31 e 32, come specificato nel capitolo 1. È stata perciò implementata una procedura matlab, il cui codice si trova in appendice A, per estrarre le radianze raw 31 e 32 dal prodotto Modis delle radianze (MOD02). Sono state estratte con la stessa procedura matlab, le informazioni di latitudine e longitudine dal prodotto Modis di geolocalizzazione (MOD03) necessarie per la geo-referenziazione dell'immagine in coordinate geografiche e il digital number relativo all'angolo zenitale del sensore necessario per il calcolo della SST con l'algoritmo (1.16).

I digital numbers  $DN_{rad}$  relativi alle radianze B sono stati poi trasformati nelle radianze fisiche utilizzando uno scale ed un offset, uguali per ogni banda, reperibili dal dataset degli attributi di Modis, mediante la seguente relazione:

$$B = scale_{rad} (DN_{rad} - offset_{rad}) \quad (4.1)$$

I digital numbers  $DN_{zen}$  relativi al sensor zenith sono stati trasformati in gradi mediante uno scale anch'esso reperibile dal dataset degli attributi di Modis:

$$sensor\ zenith = scale_{zen} DN_{zen} \quad (4.2)$$

Dopo aver calcolato le radianze e l'angolo zenitale del sensore è stata calcolata la temperatura di brillantezza in banda 31 e 32 implementando uno script matlab il cui codice è riportato in appendice A.

La temperatura di brillantezza è stata calcolata dalle radianze utilizzando la funzione di Planck:

$$B_I(T) = \frac{c_1}{I^5} \frac{1}{e^{c_2/(IT)} - 1} \quad (4.3)$$

Dalla (4.3) si ottiene la temperatura di brillantezza come:

$$T = \frac{c_2}{I \log(c_1/(I^5 B + 1))} \quad (4.4)$$

I coefficienti  $c_1$  e  $c_2$  si definiscono prima e seconda costante di radiazione.

Nota la temperatura di brillantezza nelle due bande 31 e 32, calcolata dalla (4.4), e l'angolo zenitale di acquisizione del sensore, si è potuto calcolare la SST utilizzando l'algoritmo (1.16) che si riporta di seguito per comodità specificandolo per le bande di interesse:

$$SST = C_1 + C_2 T_{31} + C_3 (T_{32} - T_{31}) + C_4 (\sec J - 1)(T_{32} - T_{31}) \quad (4.5)$$

Il team scientifico di Modis ha messo a disposizione degli utenti i valori dei coefficienti  $C_i$  calcolati utilizzando un database di 30000 punti che tenesse conto di tutte le possibili condizioni atmosferiche e di superficie. Sono state considerate anche misure relative a zone coperte da ghiacci e neve. I coefficienti stimati sono elencati in tabella 4.1.

| Coefficienti |           |
|--------------|-----------|
| $C_1$        | 1.228552  |
| $C_2$        | 0.9576555 |
| $C_3$        | 0.1182196 |
| $C_4$        | 1.774631  |

**Tabella 4.1: Coefficienti Modis dell'algoritmo (1.16) per le bande 31 e 32**

Utilizzando questi coefficienti il team di Modis ha realizzato e fornito un prodotto di SST (MOD28).

## **4.2 Misure puntuali in sito**

Prima di effettuare un confronto tra le misure di temperatura in sito e i valori di SST stimati dai dati satellitari è necessario fare qualche osservazione sulle misure puntuali effettuate per conto del Ministero dell'Ambiente.

Le stazioni di misura, in numero diverso per ogni regione, sono scelte in modo tale che ogni città abbia stazioni a diversa distanza dalla costa. Le distanze dalla costa standard utilizzate sono pari a 500m, 1000m e 1500m dalla costa.

Per ogni stazione le misure sono organizzate in campagne effettuate due volte al mese e si fa in modo che le due misure distino temporalmente di almeno 15 giorni. Per le misure puntuali in sito è di solito utilizzata una sonda multiparametrica che effettua misure a diverse profondità dalla superficie. Per questo lavoro sono state scelte le misure effettuate più vicino alla superficie, di solito intorno ai 0.5m, dovendole confrontare con i valori di temperatura stimati dai dati satellitari il cui contributo alla temperatura è solo superficiale.

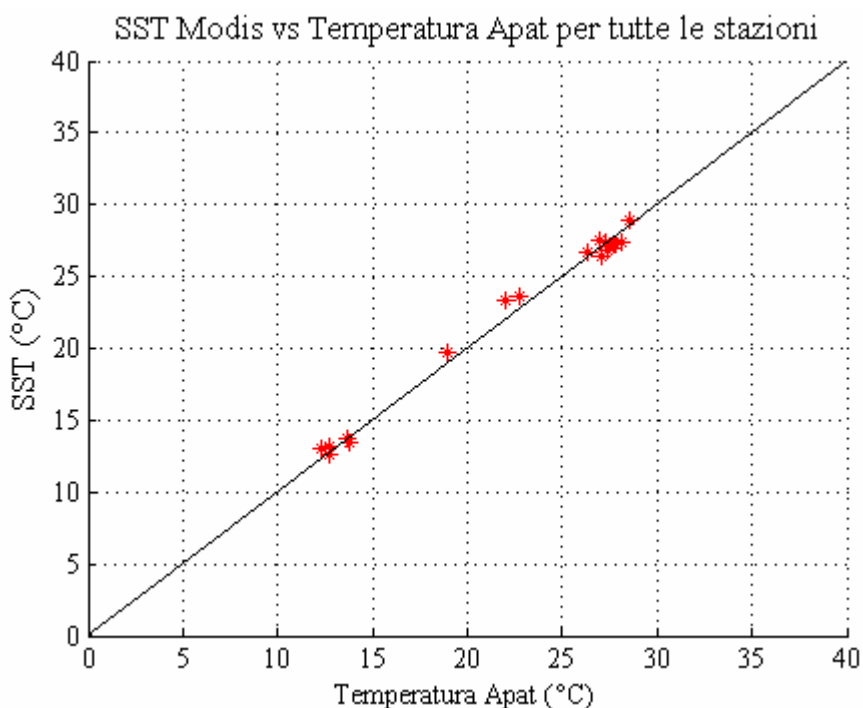
## **4.3 Confronto della SST Modis con le misure puntuali**

Il prodotto MOD28 è stato acquisito dal sito della Nasa per le immagini di interesse al fine di valutare l'andamento del modello, tarato globalmente, sulle coste italiane. In particolare, è stato fatto un confronto per le coste pugliesi tra la SST Modis e i dati puntuali di temperatura forniti dal Ministero dell'Ambiente.

A questo scopo sono state scelte alcune immagini Modis acquisite in giorni corrispondenti a quelli delle misure a mare per avere una corrispondenza temporale. Inoltre, per poter avere anche una corrispondenza spaziale, sono stati selezionati i pixel intorno alle stazioni di misura a mare modificando, per il caso in esame, un programma Matlab già implementato. Il programma Matlab ha dato come output un numero di pixel variabile da uno a quattro a seconda della posizione della stazione rispetto ai pixel dell'immagine Modis. Ad esempio, se la stazione di misura ha delle coordinate lat-long che ricadono all'interno del pixel dell'immagine, il software estrae

un singolo pixel; se la stazione si trova al confine tra due pixel dell'immagine il software estrae i due pixel confinanti; se la stazione si trova al confine, ma ad un angolo del pixel, allora il software estrae i 4 pixel vicini.

Sono state prese in considerazione soltanto quelle stazioni che avevano in corrispondenza dell'immagine Modis più di un pixel in quanto, è stato possibile verificare la precisione della georeferenziazione solo in questo ultimo caso. Perciò si è deciso di considerare il pixel numero 2 dell'immagine per effettuare il confronto con le temperature corrispondenti alle stazioni di misura, che da ora in avanti saranno indicate come temperature Apat. I dati Modis sono stati utilizzati per effettuare la serie storica della SST in determinate stazioni durante l'anno 2003.



**Figura 4.1:** Scatter plot della temperatura Modis vs la temperatura Apat

Prima di realizzare la serie storica si è fatto uno scatter plot SST vs temperatura Apat per osservare quanto la distribuzione dei punti di allontanasse dalla bisettrice. Una distribuzione dei punti sulla retta indica una forte correlazione tra le due misure e quindi, per il caso in esame, un ottimo accordo (si veda fig.4.1). L'



ottimo accordo tra le due serie di misure è confermato dall'elevato coefficiente di correlazione  $r^2$  prossimo ad 1:

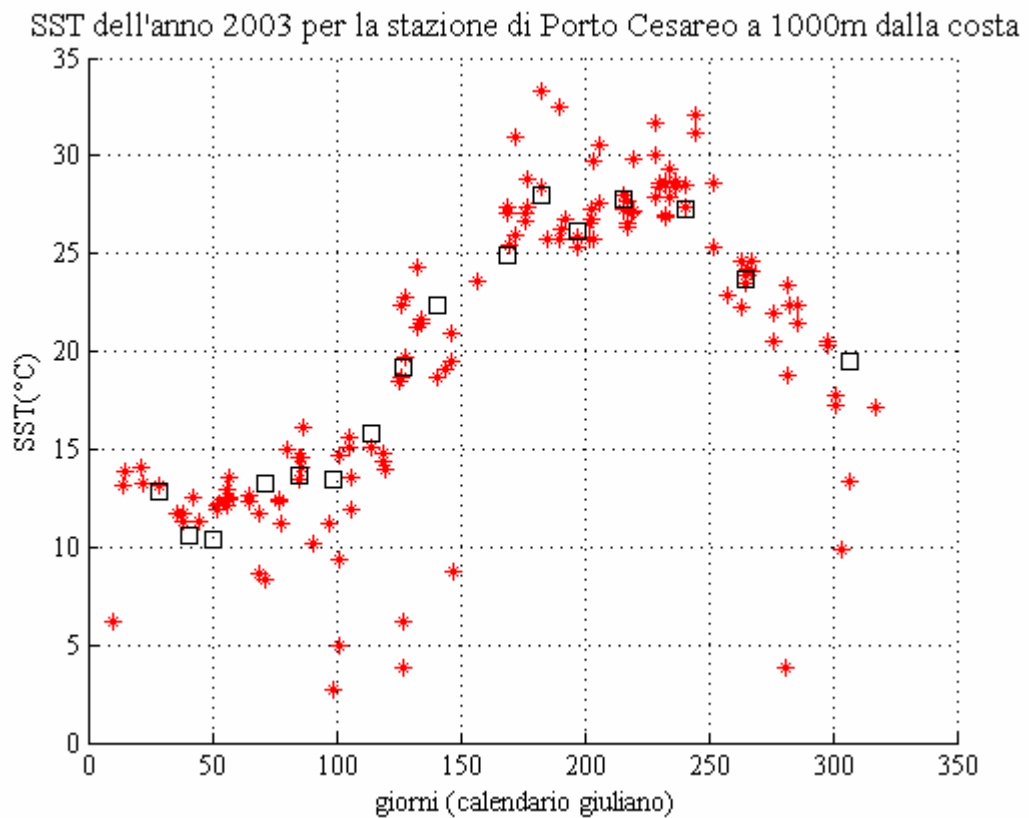
$$r^2 = 0.99206 \quad (4.6)$$

è stato calcolato anche l'errore relativo come:

$$e = \sum_{i=1}^N \frac{1}{N} \frac{|SST_{stima_i} - temp_{Apat_i}|}{temp_{Apat_i}} \quad (4.7)$$

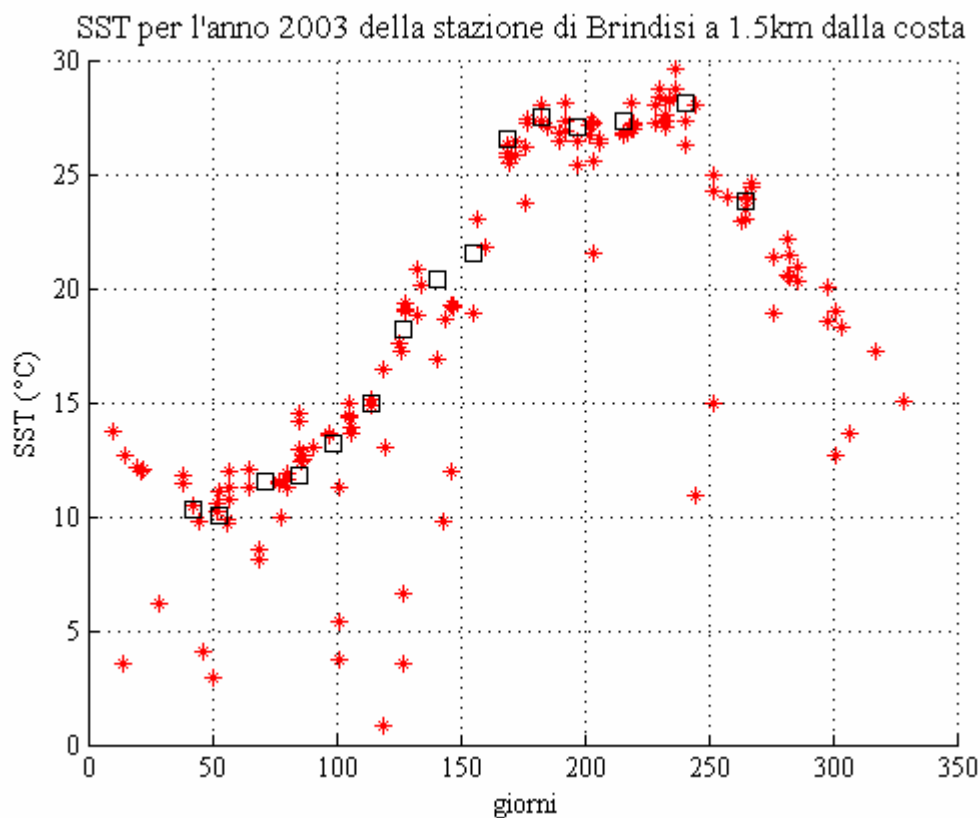
Esso risulta uguale a:

$$e = 0.002475 \Rightarrow e = 0.67K \quad (4.8)$$



**Figura 4.2:** Grafico della serie temporale per l'anno 2003 della stazione di Porto Cesareo a 1km dalla costa. Si tratta del prodotto Modis .

Si riportano solo alcune serie temporali come esempio. I risultati ottenuti sono riportati in figura 4.2 e in figura 4.3.

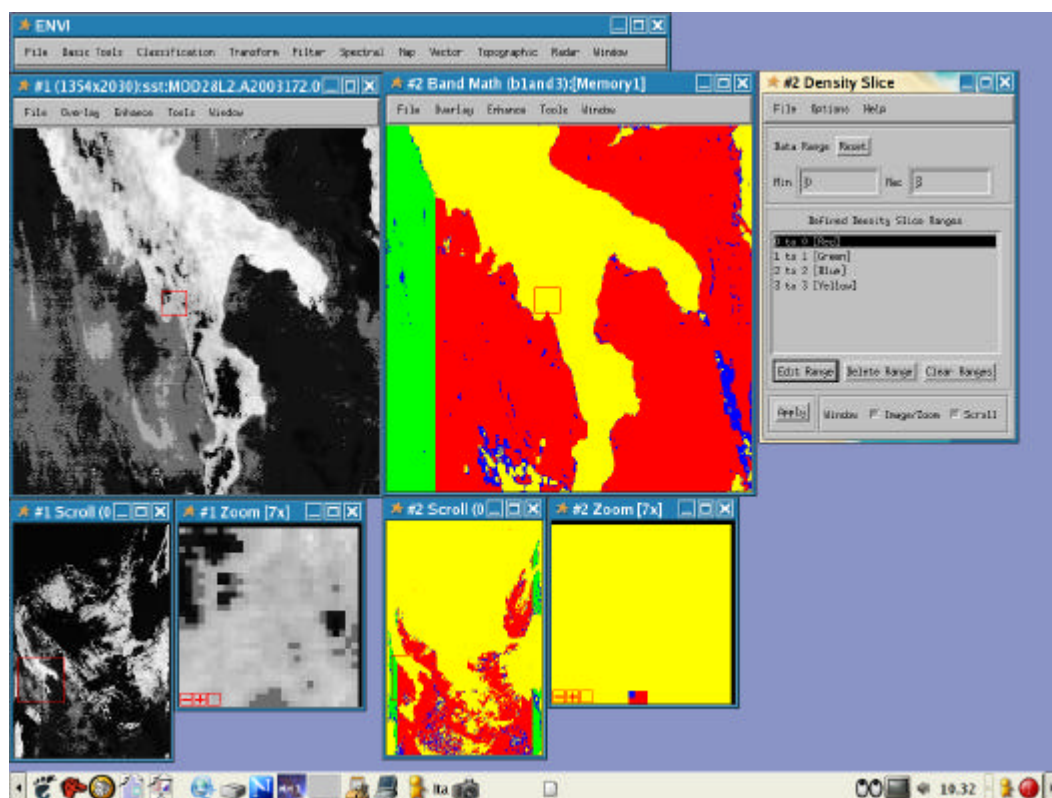


**Figura 4.3:** Grafico della serie temporale per l'anno 2003 della stazione di Brindisi a 1.5km dalla costa. Si tratta del prodotto Modis .

In rosso sono raffigurati i valori di SST forniti dal prodotto Modis, in nero i valori di misura in sito identificati come temperature Apat. I dati Modis sembrano ricalcare l'andamento generale dei punti Apat, ma ve ne sono alcuni che si dissociano totalmente da tale andamento.

Si osservi che anche il prodotto Modis è un hdf e contiene al suo interno altre informazioni oltre a quelle di SST tra cui un flag di qualità del prodotto SST fornito, detto *quality flag*. Esso è costituito da una parola ad un byte di cui i bit più significativi per la SST sono il bit 0 e il bit 1 a partire da destra. Ad ogni pixel dell'immagine è associato un valore intero tra 0, 1, 2, 3 corrispondenti rispettivamente alle combinazioni binarie 00, 01, 10, 11. Il valore decimale zero si ha quando il pixel in esame è buono, il valore 1 quando il pixel è incerto perchè

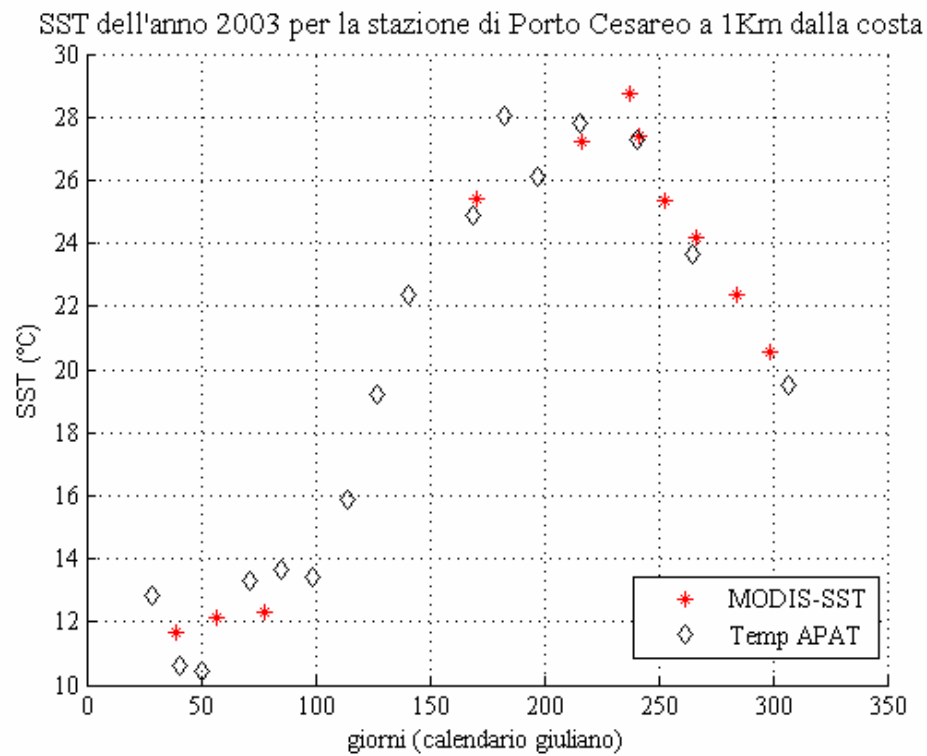
probabilmente nuvoloso, perchè corrispondente ad un'acquisizione fatta con un grande angolo zenitale del sensore ecc. Il valore decimale 2 corrisponde a pixel nuvoloso e si ha per radianze in ingresso negative o pari al livello radiometrico massimo mentre il valore 3 si ha per pixel completamente da scartare ad esempio per fallimento di correzioni atmosferiche o in caso di pixel di terra.



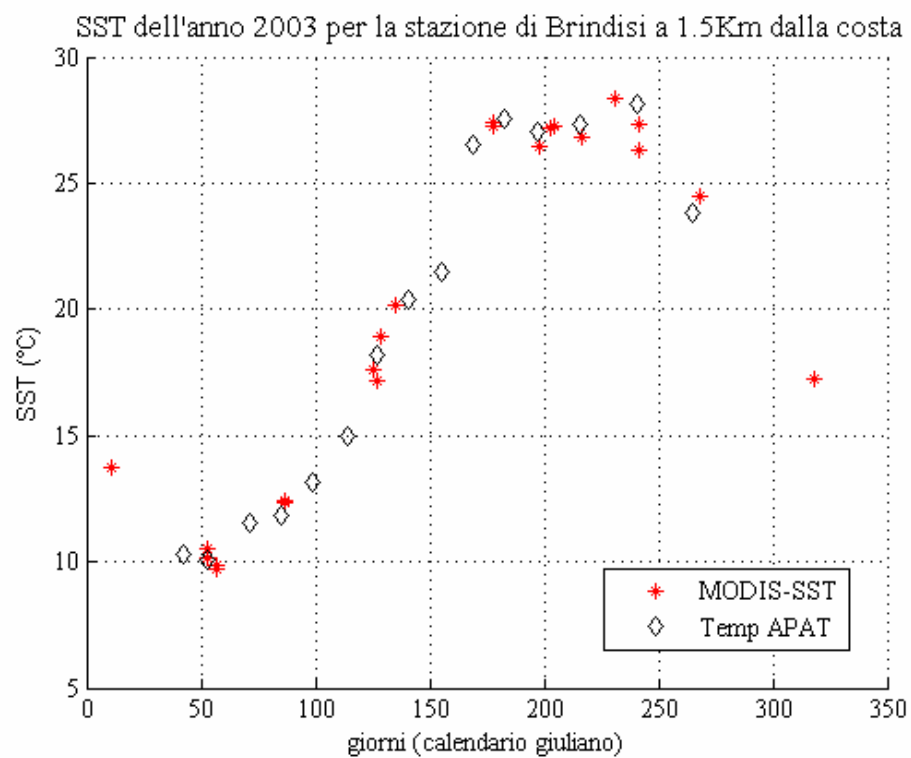
**Figura 4.4:** Esempio di qualità flag di Modis

Un esempio di qualità flag, visualizzato con il programma ENVI, è riportato in figura 4.4. Il colore rosso è associato al valore decimale 0, il verde al valore 1, il blu al valore 2 e il giallo al valore 3.

Applicando il quality flag al pixel corrispondente alla stazione di Porto Cesareo e di Brindisi per ogni giorno dell'anno coincidente con i giorni di misura nella stazione, sono state ricostruite le serie temporali in figura 4.2 e 4.3. Le serie temporali corrette sono riportate in fig.4.5 e in fig.4.6.



**Figura 4.5:** Grafico della serie temporale per l'anno 2003 della stazione di Porto Cesareo ad 1 km dalla costa dopo aver applicato il quality flag. Si tratta del prodotto Modis .



**Figura 4.6:** Grafico della serie temporale per l'anno 2003 della stazione di Brindisi a 1.5km dalla costa dopo aver applicato il quality flag. Si tratta del prodotto Modis .

Si osservi come in seguito all'applicazione del quality flag in cui sono stati considerati solo i pixel di valore decimale 0 e 1 e scartati gli altri, il grafico risulti molto più pulito. L'andamento durante l'anno delle misure Apat è rispettato, però rispetto ai grafici in figura 4.2 e 4.3, quelli in fig. 4.5 e 4.6 presentano pochissimi punti utili. Questo è dovuto alla eccessiva rigidità dei controlli fatti dal quality flag e dal team di Modis nel calibrare il modello per la determinazione dei coefficienti dell'algoritmo (1.16). Questo potrebbe essere dovuto al fatto che essi hanno considerato soltanto pixel in mare aperto per evitare i disturbi provenienti dalla terra in prossimità delle coste. In questo lavoro, si è perciò provato a determinare dei coefficienti nuovi per l'algoritmo (1.16) cercando di calibrare il nuovo modello anche sulle coste. Di questo si parlerà nel prossimo paragrafo.

#### **4.4 Calibrazione e validazione dei nuovi coefficienti per il calcolo della SST**

La calibrazione del modello è avvenuta solo sulle coste pugliesi e poi lo si è esteso a tutte le coste italiane. Dopo aver analizzato i pixel utili si è scelto di utilizzare l'80 per cento di questi punti per la calibrazione e il 20 per cento per la validazione. Il numero totale dei pixel completamente puri rilevati è pari a 69. La costruzione dei due dataset diversi è avvenuta mediante l'implementazione di un software matlab il cui codice è riportato in appendice A. Tale software calcola i coefficienti minimizzando le differenze tra i pixel utili dell'immagine e le corrispondenti temperature Apat. I coefficienti stimati sono riportati in tabella 4.2.

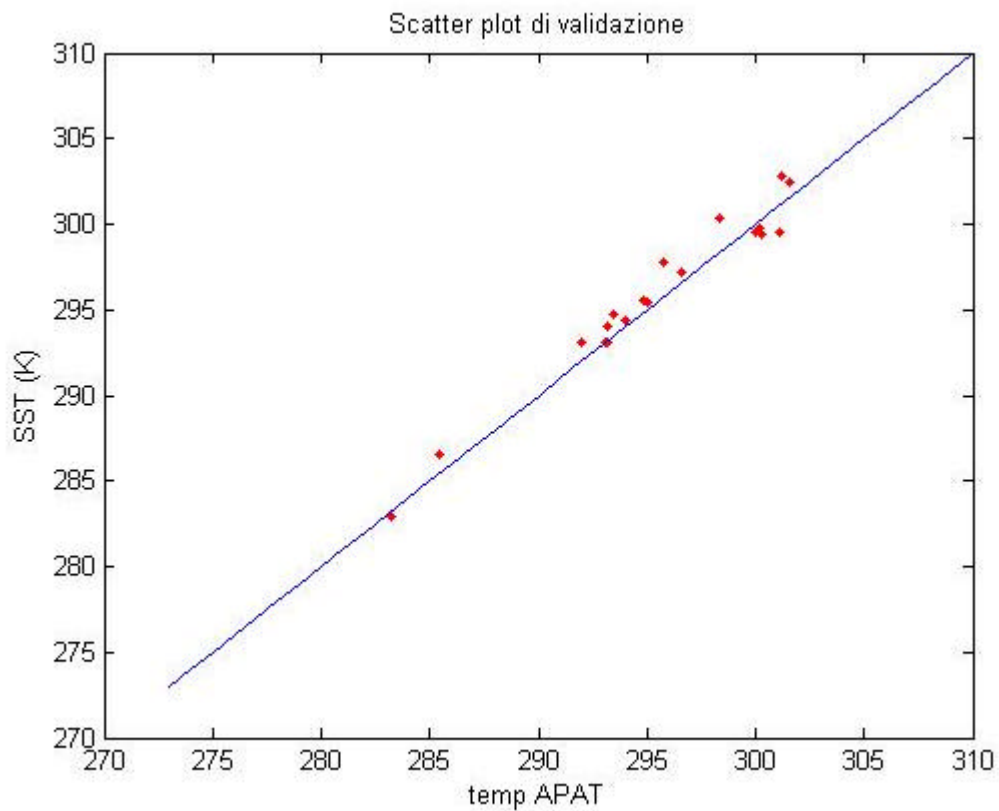
| <b>Coefficienti</b>  |         |
|----------------------|---------|
| <b>C<sub>1</sub></b> | 8.6515  |
| <b>C<sub>2</sub></b> | 0.9665  |
| <b>C<sub>3</sub></b> | -4.9646 |
| <b>C<sub>4</sub></b> | -1.1734 |

**Tabella 4.2: Coefficienti dell'algoritmo (1.16) ottimizzato**

Anche in tal caso è stato calcolato il coefficiente di correlazione tra le due serie di misure e l'errore relativo utilizzando l'espressione (4.7). Essi sono uguali rispettivamente a:

$$\begin{aligned} r^2 &= 0.9830 \\ \mathbf{e} &= 0.0030602 \Rightarrow \mathbf{e} = 0.83K \end{aligned} \quad (4.9)$$

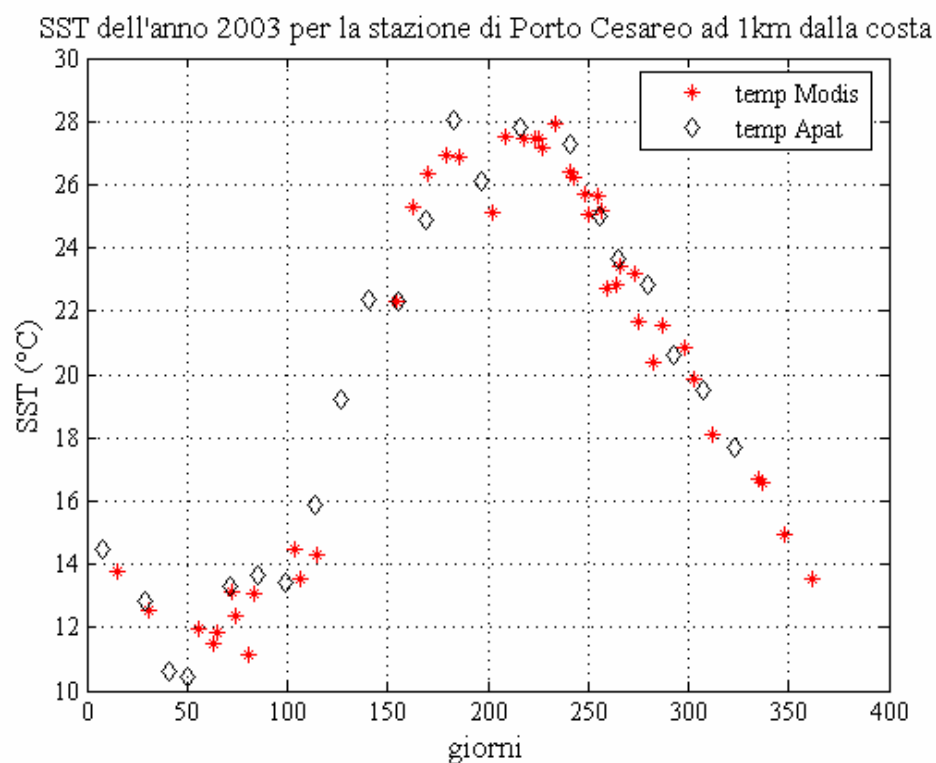
Calibrato il modello, esso è stato poi validato utilizzando il dataset di validazione. In figura 4.7 se ne riporta lo scatter plot.



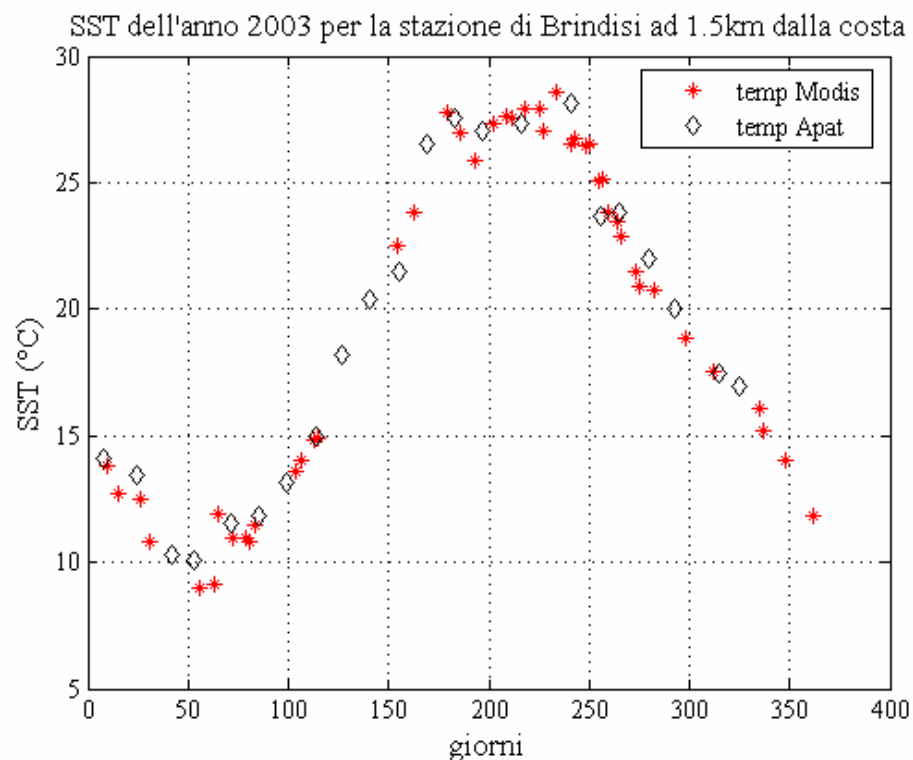
**Figura 4.7:** Grafico dello scatter plot di validazione

Come si può notare, sia dalla figura che dal coefficiente di correlazione anche in tal caso l'accordo risulta buono.

Sono state quindi calcolate le serie temporali per le stazioni pugliesi dell'anno 2003 e si è fatto un confronto con i dati di misura in sito. Si riportano di seguito le serie temporali realizzate con questo algoritmo per le stesse stazioni rappresentate nel paragrafo 4.3 (si vedano le figure 4.8 e 4.9).



**Figura 4.8:** Grafico della serie temporale per l'anno 2003 della stazione di Porto Cesareo a 1km dalla costa calcolate utilizzando l'algoritmo ottimizzato.



**Figura 4.9:** Grafico della serie temporale per l'anno 2003 della stazione di Brindisi a 1.5km dalla costa calcolate utilizzando l'algoritmo ottimizzato.

Si osservi come le prestazioni dei due algoritmi risultino simili, ma il fatto di aver incluso nel set di calibrazione delle stazioni di misura molto vicine alla costa, ha aumentato il numero di punti disponibili rendendo il modello utilizzabile anche in prossimità delle coste.

## 4.5 Realizzazione della mappa di temperatura nel GIS

Dopo aver testato l'affidabilità dell'algoritmo elaborato per questo lavoro di stage, sono state analizzate le immagini Modis dell'anno 2003 al fine di sceglierne una in cui comparisse tutta l'Italia ed essa fosse il più possibile sgombra da nuvole e dal fenomeno del sun glint. In seguito a questa analisi è stata scelta l'immagine del 4 Agosto. È stato, quindi, realizzato un progetto ArcGIS all'interno del quale sono state create due mappe della *sea surface temperature* lungo le coste italiane; una mappa è



stata realizzata utilizzando il prodotto Modis di SST e l'altra utilizzando i valori di SST stimati con l'algoritmo (1.16) i cui coefficienti sono riportati in tabella 4.2.

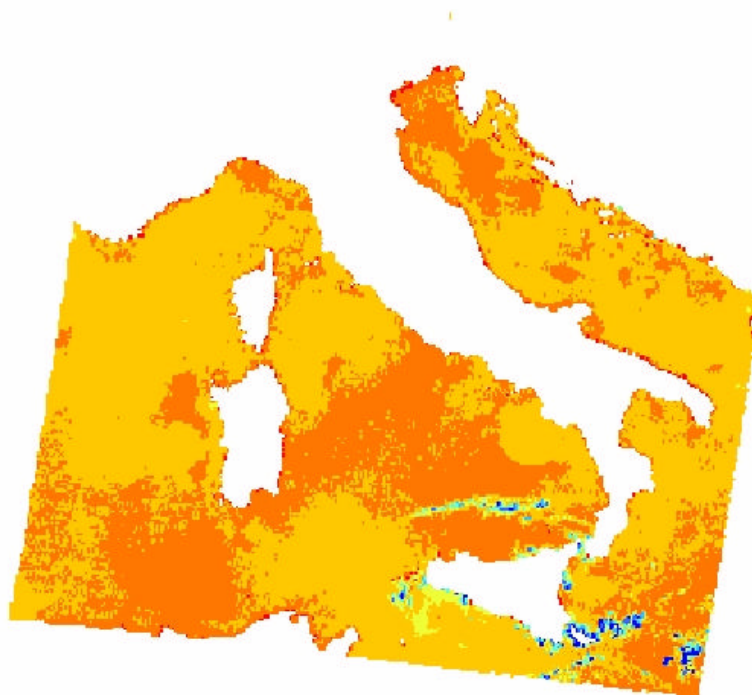
All'interno di questo progetto è possibile interrogare le due mappe conoscendone la temperatura in qualsiasi punto. È inoltre possibile sovrapporre all'una o all'altra mappa le stazioni di misura Apat in cui è stata effettuata la misura il giorno 4 Agosto in modo da rendere possibile un confronto immediato tra le due temperature.

Si descrive ora il modo in cui è stato realizzato tale progetto. I dati elaborati con il software matlab sono stati esportati come file testo ed è stata creata in Microsoft Access una tabella con quattro campi: latitudine e longitudine del centro pixel, SST del pixel e un identificativo. La tabella Access è stata importata in ArcGIS 9 e, mediante l'estensione Spatial Analyst, si è creato uno shapefile di punti dalla tabella. Lo shapefile di punti, che era in coordinate geografiche, è stato poi proiettato in coordinate UTM, datum WGS84, e si è assegnato all'Italia il fuso 32N.

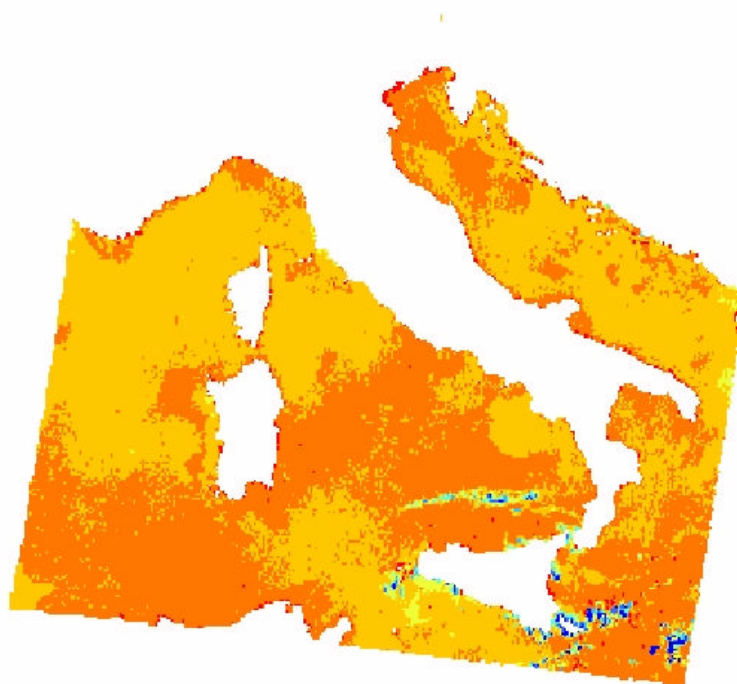
Essendo interessati soltanto a zone di mare, si sono eliminati i punti di terra dallo shapefile mediante una selezione per posizione dei punti. Per fare questo è stato utilizzato uno shapefile di linee contenente la linea di costa dell'Italia, dell'Europa e dell'Africa e sono stati scartati tutti quei punti che ricadevano all'interno della linea di costa. Si è, quindi, creato un nuovo shapefile di punti soltanto con i punti di mare.

Quest'ultimo è stato convertito in un raster utilizzando l'estensione Spatial Analyst. Il raster è stato creato sul campo SST usando come estensione della cella elementare del raster quella proposta di default. Il procedimento appena descritto è stato effettuato sia per la SST Modis che per la SST stimata con l'algoritmo minimizzato.

Le mappe di temperatura realizzate sono riportate in figura 4.10 e in figura 4.11.



*Figura 4.10:* Mappa di temperatura ottenuta dal prodotto Modis di SST



*Figura 4.11:* Mappa di temperatura ottenuta dall' algoritmo di SST ottimizzato

Con il blu sono rappresentati i valori di temperatura più bassi, con il rosso quelli più alti; i valori di temperatura intermedi sono rappresentati con tutte le gradazioni di arancio.

Come si può notare osservando le due mappe, quella realizzata con i valori di SST calcolati usando l'algoritmo ottimizzato, presentano delle temperature leggermente più alte in prossimità delle coste (si vede dal colore leggermente più scuro) come ci si aspettava. L'algoritmo, inoltre, è stato in grado di riconoscere la presenza di nuvole nei pressi della Sicilia, come si vede in figura dal fatto che esse hanno una temperatura più bassa. Sono, infatti, di colore blu.

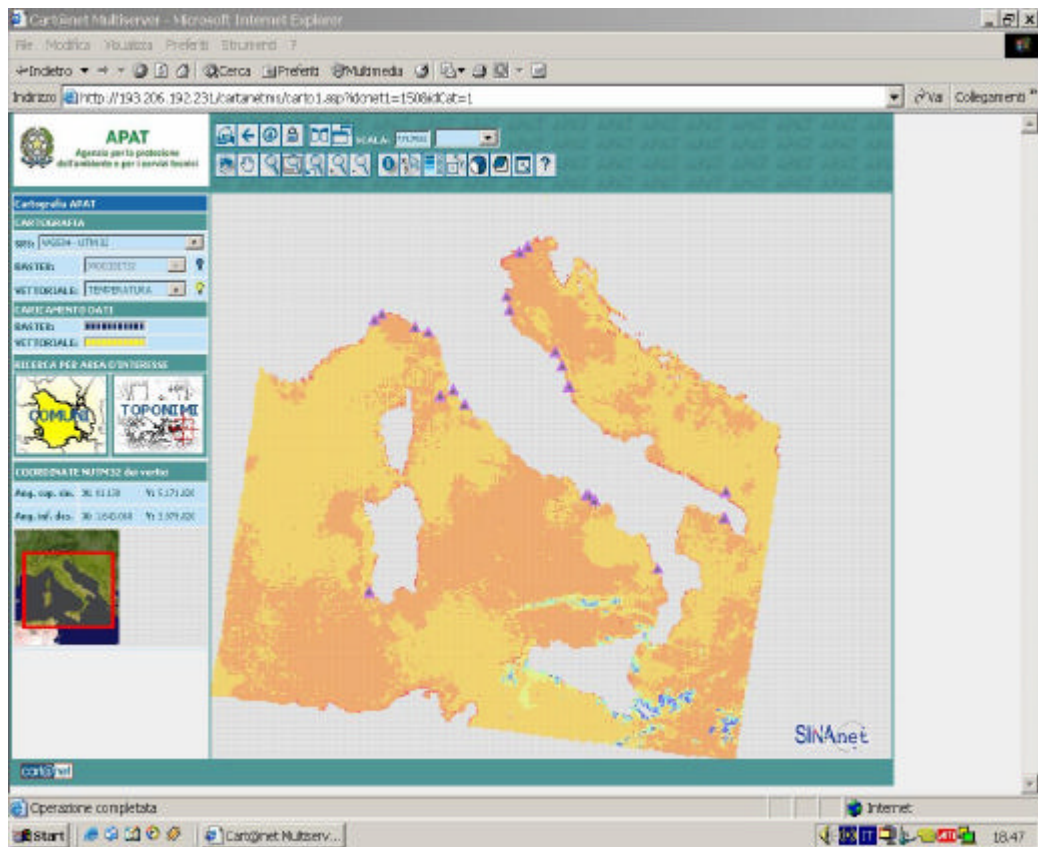
Infine è stato realizzato lo stesso servizio con un software avente un'architettura di tipo client/server, l'ArcIMS, in modo che il servizio fosse disponibile in rete.

Essendo l'interfaccia user-friendly di questo software piuttosto limitata, è stato creato il file .axl del progetto da ArcGIS utilizzando l'estensione opportuna disponibile in rete e si è implementato il servizio in ArcXML (linguaggio supportato dall'ArcIMS Author) modificando manualmente l'axl creato. Il codice implementato è riportato in appendice B. Il progetto finale di tale lavoro, è stato infine, pubblicato sul sito:

<http://193.206.192.231/cartanetms/> (04/12/2004)

con il nome di "Temperatura Modis". Il sito su cui è stato pubblicato il progetto è completamente interattivo: è possibile fare uno zoom su una zona di interesse, accendere e spegnere di layers, inserire la legenda e interrogare direttamente il progetto per avere informazioni sulla temperatura della mappa in una qualsiasi zona d'interesse anche sulla temperatura delle misure in sito.

L'interfaccia del sito è mostrata nella figura seguente:



**Figura 4.12:** Interfaccia del sito su cui è stato pubblicato il lavoro descritto in questa tesi.

## Conclusioni

Nel presente lavoro di stage è stata realizzata una mappa di sea surface temperature ottenuta elaborando immagini satellitari Modis. Mediante elaborazione numerica con il software matlab si è sviluppato un modello di calcolo della SST basato sugli algoritmi di stima della stessa forniti dal team scientifico di Modis [2]<sup>21</sup>.

Per prima cosa è stato valutato l'accordo tra il prodotto Modis di SST e le misure in situ calcolandone il coefficiente di correlazione risultato pari a 0.99206 con un errore relativo pari a 0.00247 corrispondente a 0.65 gradi Kelvin. Tale accordo è risultato essere molto buono a scapito, però, di una scarsa disponibilità di punti utili a causa della eccessiva rigidità dei controlli effettuati per il territorio italiano. In più l'algoritmo originale fornito dal team scientifico di Modis risulta poco adatto ad essere utilizzato in prossimità delle coste, in quanto i pixel costieri, di solito contaminati da radiazione di fondo e dalla presenza della terra, che presenta una emissività più alta dell'acqua, sono stati scartati.

In seguito si è effettuato un confronto tra le misure puntuali e il modello sviluppato in questo lavoro di stage. Si è trovato che il modello sviluppato presenta un accordo lievemente minore tra il prodotto SST ottenuto e le temperature Apat confermato dal coefficiente di correlazione leggermente più basso pari a 0.9830 e un errore relativo leggermente più alto pari a 0.00306 corrispondente a circa 0.9 gradi

---

<sup>21</sup> Brown, Minnett, MODIS Algorithm Theoretical Basis Document (1999)

Kelvin. D'altra parte fornisce un numero di punti utili decisamente più elevato del precedente.

Questo può essere dovuto al fatto di aver considerato un dataset di calibrazione del modello molto vario, che lo rende più adatto all'utilizzo su pixel costieri oppure al fatto di aver fatto delle correzioni dei fenomeni nuvolosi mirate allo specifico utilizzo.

Entrambi i modelli, calibrati sulle stazioni pugliesi, sono stati estesi a tutta l'Italia e il confronto con i dati puntuali ha dato, ancora una volta, buoni risultati. Tali risultati sono stati poi inseriti in un sistema informativo geografico.

Per rendere accessibili tali informazioni ad un utente esterno si è pubblicato il lavoro fatto sul sito Cartanet dell'Apat in cui sono raccolti molti servizi ambientali.

In conclusione il presente lavoro di stage, a nostro parere, ha mostrato le potenzialità delle misure satellitari, permettendo di avere informazioni di temperatura affidabili anche dove non è possibile effettuare misure in sito e confermando così in positivo l'ipotesi della possibilità di integrazione dei dati satellitari con i dati puntuali.

## Bibliografia

- [1] Fundamentals of Remote Sensing, Natural Resources of Canada
- [2] O.B. Brown, P.J. Minnett, MODIS Infrared Sea Surface Temperature Algorithm, *Algorithm Theoretical Document*, Version 2.0 (1999)
- [3] P. Y. Deschamps, T. Phulpin, Atmospheric corrections of infrared measurements of sea surface temperature using channels at 3.7  $\mu\text{m}$ , 11  $\mu\text{m}$ , 12  $\mu\text{m}$ , *Boundary Layer Meteor.* **18**, 131-143 (1980)
- [4] D. Anding, R. Kauth, Estimation of Sea Surface Temperature from Space, *Remote Sensing of the Environment* **1**, 217-220 (1970)
- [5] D. T. Llewellyn-Jones, P. J. Minnett, R. W. Saunders, A. M. Zàvody, Satellite multichannel infrared measurements of sea surface temperature of the N.E. Atlantic Ocean using AVHRR/2, *Quart. J. R. Met. Soc.* **110**, 613-631 (1984)
- [6] K. Kilpatrick, How is sea surface temperature calculated from Modis level 1B radiance measurements?  
[http://daac.gsfc.gov/MODIS/FAQ/A\\_sci\\_L1B\\_SST.html](http://daac.gsfc.gov/MODIS/FAQ/A_sci_L1B_SST.html) (Dec. 2003)
- [7] G. A. Wick, J. J. Bates, D. J. Scott, Satellite and skin layers effects on the accuracy of sea surface temperature measurements from the GEOS satellites (1999)

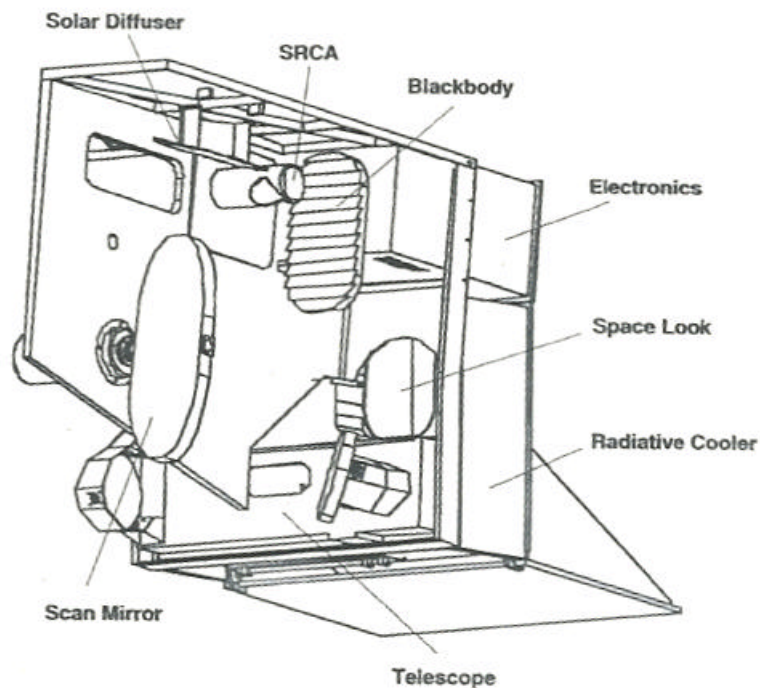
- [8] P. J. Minnett, Radiometric measurements of the sea surface temperature: the competing roles of the diurnal thermocline and the cool skin, *International Journal of Remote Sensing*, **24**, 5033-5047
- [9] W. B. Rossow, L.C Garder, Cloud detection using satellite measurements of infrared and visible radiances, *ISCCP6* 2341-2369 (1993)
- [10] D. P. Wylie, W. P. Menzel, H. M. Woolf, K. I. Strabala, Four years of global cirrus cloud statistics using HIRS, 71972-71986 (1994)
- [11] R. A. Frey, S. A. Ackerman, B. J. Soden, Climate parameters from satellite spectral measurements. Part I: Collocated AVHRR and HIRS/2 observations of the spectral greenhouse parameter, 9327-9344 (1995)
- [12] S. Ackerman, K. Strabala, P. Menzel, R. Frey, C. Moeller, L. Gumley, B. Baum, S. W. Seeman, H. Zhang, Discriminating clear-sky from cloud with Modis algorithm theoretical basis document (MOD35), (Oct. 2002)
- [13] R. W. Saunders, K. T. Kriebel, An improved method for detecting clear sky and cloudy radiances from AVHRR data, 9123-9150 (1988)
- [14] T. Inoue, A cloud type of classification with NOAA7 split window measurements, 923991-924000, (1987)
- [15] GESP S.r.l., Introduzione ai sistemi informativi geografici (1999), via Polidoro da Caravaggio,15 Milano



# Appendice A

## Modis

Modis (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) fa parte di una nuova serie di sensori multispettrali che sono stati sviluppati sia per applicazioni marine che per quelle terrestri e atmosferiche. Tale sensore possiede un set di 36 bande spettrali con risoluzione, al nadir, di 250m, 500m, e 1000m. Attualmente sono 2 i sensori Modis che orbitano intorno alla Terra. Il primo fu lanciato il 18 dicembre 1999 su piattaforma 'Terra' mentre il secondo è stato lanciato il 4 maggio 2002 su piattaforma 'Aqua'.



*Figura A.1* : Disegno schematico del Modis. Il sensore è visto al suo interno con i suoi elementi Principali.

---

Le bande da 1 a 7 sono dedicate all'osservazione della superficie terrestre e delle proprietà delle nuvole e degli aerosol. In pratica queste bande coincidono con quelle di un altro sensore, Landsat TM, dedicato all'osservazione della terra, e sono anche le bande che presentano una risoluzione maggiore. Le nove bande che vanno dalla 8 alla 16 sono dedicate all'osservazione del colore del mare. Esse derivano dagli studi effettuati sui sensori come il SeaWiFS e il CZCS (Coastal Zone Color Scene). Le bande dalla 17 alla 19 sono state individuate in seguito agli studi fatti con un sensore iperspettrale aviotrasportato AVIRIS. Esse consistono in 2 bande strette e una banda più ampia intorno ai 900nm, e permettono l'osservazione delle nuvole nella bassa troposfera oltre che di altre importanti proprietà delle nuvole. Anche la banda 26 ha origine dall'analisi dei dati AVIRIS, i quali hanno dimostrato una maggior capacità nell'osservazioni dei cirri<sup>22</sup> se si utilizza una banda intorno ai 1,380  $\mu\text{m}$  (per ragioni di costi ha sostituito una originaria banda pensata per essere centrata intorno ai 3,959  $\mu\text{m}$ ). Le restanti bande sono derivate dalle bande di un altro sensore, HIRS, e sono essenzialmente dedicate alla determinazione della temperatura sia superficiale, che atmosferica.

Entrambi i satelliti su cui è montato il Modis descrivono un'orbita circolare ad una altezza di 705 km eliosincrona, quasi polare. 'Terra' con nodo discendente, mentre 'Aqua' con nodo ascendente. Combinato con l'angolo di scansione del sensore che è di  $\pm 55^\circ$  permette uno swath di 2330km perpendicolarmente alla linea di volo. Entrambi i satelliti permettono una copertura globale in circa 2 giorni.

Per mantenere una certa continuità con le missioni precedenti, le bande dedicate al colore del mare del Modis sono molto simili a quelle del SeaWiFS, ma hanno il vantaggio di essere più strette (10nm contro 20nm, eccetto che le bande 8 e 9 che hanno una larghezza di 15nm per rispettare le specifiche in termini di rapporto segnale rumore). Un'altra importante caratteristica delle bande nel colore del mare del Modis è il più alto rapporto segnale rumore (SNR) rispetto ai sensori precedenti. La tabella A.1, alla pagina seguente, mostra i valori di SNR per il Modis, confrontandoli con quelli relativi ai sensori precedenti. Tali valori sono relativi ad un valore di radianza specificato nella colonna ' $L_{in,spec}$ '. Un SNR più elevato è

---

<sup>22</sup> I cirri sono nubi alte bianche e trasparenti, che hanno una struttura fibrosa e sfilacciata, che sono formate da piccoli aghi ghiacciati. Queste nubi si formano ad una altezza di 9000 m, che si presentano sotto varie forme: a ciuffi isolati, a strisce piumose, a filamenti ramificati o terminanti in ciuffi ritorti.

vantaggioso nel telerilevamento del colore del mare, a causa del basso segnale utile rispetto a quello totale, si può notare anche che le bande a più alta risoluzione (che non sono specifiche per il mare) hanno un SNR relativamente basso. Il valore di SNR più elevato lo hanno le bande 13 e 14, necessario per determinare quantitativamente la fluorescenza della clorofilla-a stimolata dal sole. Il picco di fluorescenza della clorofilla, produce una deviazione positiva dal valore di radianza dell'acqua pura attesa.

Le bande ad alta risoluzione hanno un SNR più basso, ma comunque più elevato del CZCS, e quindi sono utili soprattutto per le zone costiere, per le quali l'aumento dell'incertezza dovuto ad un SNR più basso è compensato dall'alta risoluzione. Infatti con una risoluzione più bassa la probabilità di avere pixel misti, cioè che contengono sia zona di acqua che quelle di terra, aumenta. L'errore sulla misura è molto alto su questi tipi di pixel, nettamente superiore rispetto a pixel con risoluzione più bassa ma con un SNR più alto.

| Band           | Wavelength    | $L_{in,spec}$ | $SNR_{spec}$ | $SNR_{actual}$ |
|----------------|---------------|---------------|--------------|----------------|
| <b>CZCS</b>    |               |               |              |                |
| 1              | 443           | 54.10         | 150          | 260            |
| 2              | 520           | 35.00         | 140          | 260            |
| 3              | 550           | 28.60         | 125          | 233            |
| 4              | 670           | 13.40         | 100          | 143            |
| <b>SeaWiFS</b> |               |               |              |                |
| 1              | 412           | 91.00         | 499          | 940            |
| 2              | 443           | 84.10         | 674          | 950            |
| 3              | 490           | 65.60         | 667          | 1156           |
| 4              | 510           | 54.40         | 640          | 1055           |
| 5              | 555           | 44.50         | 596          | 690            |
| 6              | 670           | 26.00         | 442          | 798            |
| 7              | 758           | 16.10         | 455          | 860            |
| 8              | 865           | 10.90         | 467          | 670            |
| <b>MODIS</b>   |               |               |              |                |
| 8              | 411           | 44.90         | 880          | 933            |
| 9              | 442           | 41.90         | 838          | 1325           |
| 10             | 487           | 32.10         | 802          | 1308           |
| 11             | 530           | 27.90         | 754          | 1385           |
| 12             | 547           | 21.00         | 750          | 1114           |
| 13             | 665           | 9.50          | 910          | 1163           |
| 14             | 677           | 8.70          | 1087         | 1265           |
| 15             | 746           | 10.20         | 586          | 1077           |
| 16             | 866           | 6.20          | 516          | 1000           |
| 3              | 466 (0.5 km)  | 35.30         | 243          | 316            |
| 4              | 553 (0.5 km)  | 39.00         | 228          | 302            |
| 1              | 644 (0.25 km) | 21.80         | 128          | 168            |
| 2              | 855 (0.25 km) | 24.70         | 201          | 414            |

**Tabella A.1:** Confronto tra le bande del Modis e quelle relative ai sensori suoi predecessori.  $SNR_{spec}$  indica il rapporto segnale rumore specificato in fase di progettazione, mentre  $SNR_{actual}$  è quello raggiunto, ad un radianza  $L_{in,spec}$ , quest'ultima espressa in  $Wm^{-2} m^{-1} sr^{-1}$ .

# Appendice B

## Codici Matlab implementati

In questa appendice si riportano alcuni dei codici matlab implementati per sviluppare il lavoro divisi per sezione.

### B.1 Estrazione delle informazioni da un hdf

```
clear

%*****leggo il file*****

disp('apro hdf') nomedir='C:/Documents and
Settings/Annalisa/Documenti/MASTER/
STAGE/prove_matlab/MODIS/immagini_2003/';
lista=dir(fullfile(nomedir,'*.hdf'));

    nomefile=strcat(nomedir,lista.name);
    disp(nomefile);
    sd_id=hdfsd('start',nomefile,'read');
    [ndatasets,nglobal_atts,stat]=hdfsd('fileinfo',sd_id);

% sds_idx serve per scegliere l'informazione da estrarre. Ad es.
% sds_idx =3 rappresenta il quarto dataset nella lista
% degli attributi che è il sensor zenith del MOD03.

sds_idx = 0; % dataset 4 per le bande emissive da mod02,
            % dataset 3 per sensor zenith da mod03,
            % dataset 0 per sst mod28
```

```

sds_id=hdfsd('select',sd_id,sds_idx);
[ds_name,ds_ndims,ds_dims,ds_type,ds_atts,stat]=
hdfsd('getinfo',sds_id);

ds_start=zeros(1,ds_ndims);
ds_stride=[];
ds_edge=ds_dims;
[ds_data,stat]=
    hdfsd('readdata',sds_id,ds_start,ds_stride,ds_edge);

%dig_num_emissive31=zeros(2030,1354);
ds_data=double(ds_data);

%-- trasformazione Digital Numbers in radianza banda 31----

    dig_num_emissive31=ds_data(:,:,11);
%11 mi dà i digital numbers della banda 31
    scale31=0.00084002;
    offset31=1577.33972168;
    rad_emissive31=scale31.*(dig_num_emissive31 - offset31);

% ---- trasformazione Digital Numbers in radianza banda 32----

    dig_num_emissive32=ds_data(:,:,12);
    scale32=0.00072970;
    offset32=1658.22131348;
    rad_emissive32=scale32.*(dig_num_emissive32 - offset32);

% ---- trasformazione DN in gradi per sensor zenith -----

scale_factor = 0.01000000;
se_zen= scale_factor .* ds_data;

%-----

%figure,imagesc(Lat);
status=hdfsd('endaccess',sds_id)
status=hdfsd('end',sd_id)

```

```
%      clear ds_data.
```

## B.2 Calcolo della temperatura di brillanza

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%  FUNCTION TO CONVERT A RADIANCE VALUE INTO
%      A BRILLIANCE TEMPERATURE ONE
%
%  Notes:      The function simply inverts Plank Equation
%  Parameters: "lamda" is wave length of considered Modis band.
%  Insert it in micron !
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function Temp=B2T(B,lamda)

% Function Parameters
% B      = radianza
% h      = 6.63e-34;    % [W*s^2] Planck's Constant
% k      = 1.38e-23;    % [W*s/K] Boltzman Constant
% c      = 2.99e8;      % [m/s]   Speed of Light
% c1     = 1.1911e8;    % 2*pi*h*c2  % [W m^2 sr^(-1)*micron^(-5)]
%                               %1st Radiation Constant
% c2     = 1.439e4;     % h*c/k    % [micron*K]
%                               %2nd Radiation Constant

l=log(1+(c1./(B.*(lamda.^5))));

Temp=c2./(lamda.*l);
```

## B.3 Scelta delle stazioni di calibrazione e di validazione

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%  TALE PROG DEFINISCE UN DATASET DI CALIBRAZIONE E UNO DI
%  VALIDAZIONE SALVANDO L'80% DEI PUNTI DISPONIBILI PER OGNI
```

```
% STAZIONE IN UN VETTORE CHE SARA' USATO PER LA CALIBRAZIONE
% E IL 20% DI QUESTI IN UN VETTORE CHE
% SARA' USATO PER LA VALIDAZIONE
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%-- INIZIALIZZAZIONE VETTORI FINALI DI CALIB E VALID -----
```

```
BT31c=[];
```

```
BT31v=[];
```

```
BT32_31c=[];
```

```
BT32_31v=[];
```

```
BT31_32c=[];
```

```
BT31_32v=[];
```

```
se_zenc=[];
```

```
se_zenv=[];
```

```
temp_APAT_C=[];
```

```
temp_APAT_V=[];
```

```
BT20c=[];
```

```
BT20v=[];
```

```
%-----
```

```
num_staz_tot=21;
```

```
for staz=1:num_staz_tot
```

```
    BT31_prov = BT31(:,staz);
```

```
    BT31_prov = BT31_prov';
```

```
    BT32_31_prov = BT32_31(:,staz);
```

```
    BT32_31_prov = BT32_31_prov';
```

```
    BT31_32_prov = BT31_32(:,staz);
```

```
    BT31_32_prov = BT31_32_prov';
```

```

temp_APAT_prov = temp_APAT(:,staz);
temp_APAT_prov = temp_APAT_prov';

BT20_prov = BT20(:,staz);
BT20_prov = BT20_prov';

se_zen_prov = se_zen(:,staz);
se_zen_prov = se_zen_prov';

ind=find(isnan(BT20_prov)==0);
L=length(ind);
Lcal=fix(80*L/100); %approx al più piccolo o uguale
%Lval=ceil(20*L/100); %approx al più grande o uguale
Lval= L-Lcal;

if (Lcal==0)
    disp('non ci sono punti disponibili per la calibrazione')
else
    BT31_cal = BT31_prov(ind(1:Lcal));
    BT31c = [BT31c BT31_cal];

    BT32_31_cal = BT32_31_prov(ind(1:Lcal));
    BT32_31c = [BT32_31c BT32_31_cal];

    BT31_32_cal = BT31_32_prov(ind(1:Lcal));
    BT31_32c = [BT31_32c BT31_32_cal];

    se_zen_cal = se_zen_prov(ind(1:Lcal));
    se_zenc = [se_zenc se_zen_cal];

    temp_APAT_cal = temp_APAT_prov(ind(1:Lcal));
    temp_APAT_C = [temp_APAT_C temp_APAT_cal];

    BT20_cal = BT20_prov(ind(1:Lcal));
    BT20c = [BT20c BT20_cal];

end

```





```

% TALE SOFTWARE CALCOLA I COEFFICIENTI CHE MEGLIO OTTIMIZZANO
% L'ALGORITMO DELLA NASA UTILIZZANDO UNA TECNICA DI
% MINIMIZZAZIONE AI MINIMI QUADRATI. UNA VOLTA
% DETERMINATI I COEFFICIENTI PER CALCOLARE LA SST LANCIARE
% IL PROGRAMMA SST.m

% ESEGUIRE DOPO scelta_dataset.m

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

SST_stima=zeros(49,4); SST_stima(:,1)=ones(size(BT31c'));
SST_stima(:,2)=BT31c'; SST_stima(:,3)=BT32_31c';
SST_stima(:,4)=(sec(deg2rad(se_zenc'))-1).*BT32_31c';

temp_APAT_C= temp_APAT_C';

scarto = SST_stima\(temp_APAT_C + 273)

% ----- coefficienti trovati in ordine C1-C4 -----

%      8.6515
%      0.9665
%     -4.9646
%     -1.1734

%-----

```

