

## **CORREZIONI ATMOSFERICHE E TOPOGRAFICHE DI IMMAGINI SATELLITARI NELL'AMBITO DEL PROGETTO SISTEMA RISCHIO VULCANICO**

Sergio TEGGI<sup>(\*)</sup>, Eleonora BERTACCHINI<sup>(\*)</sup>, Massimo MUSACCHIO<sup>(\*\*)</sup>, Maria Fabrizia  
BUONGIORNO<sup>(\*\*)</sup>

(\*) Università degli studi di Modena e Reggio Emilia, Via Vignolese 905 - 41100 Modena, Italy.  
Tel.: +39 059-2056131; e-mail: teggi@unimo.it, eleonora.bertacchini@unimore.it

(\*\*) Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Via di Vigna Murata 605 - 00143, Roma, Italy.  
Tel.: +39 06-51860618; e-mail: musacchio@ingv.it

### **Riassunto**

In questo contributo vengono presentate due procedure software sviluppate per l'applicazione delle correzioni atmosferiche e topografiche ad immagini satellitari, basate sui modelli di trasferimento radiativo MODTRAN e 6S e sui modelli digitali del terreno (DTM). Queste procedure sono state realizzate in modo da potere essere annidate all'interno della catena di elaborazioni previste nel Sistema Rischio Vulcanico (SRV, progetto ASI-Agenzia Spaziale Italiana). La prima procedura è un riadattamento del software CIRILLO, sviluppato dagli Autori e già collaudato, pensato per le correzioni atmosferiche e topografiche nelle regioni spettrali del visibile-vicino infrarosso (VNIR). La seconda procedura, tuttora in fase di completamento, copre la restante regione spettrale dell'infrarosso termico (TIR). Entrambe le procedure sono state sviluppate in linguaggio IDL e in ambiente ENVI, e possono trattare i principali sensori satellitari attualmente in uso o ulteriori sensori definiti dall'utente.

### **Abstract**

This proposal presents two software procedures built in order to apply atmospheric and topographic corrections to spaceborne satellite images and based on radiative transfer models (6S and MODTRAN) and on DTM (*Digital Terrain Model*). These procedures are meant to be nested into the chain of the project ASI-Sistema Rischio Vulcanico. The first procedure results from a previous version built for atmospheric and topographic corrections for the VNIR (*Visible Near Infrared*) in the CIRILLO software. While the second one, for the TIR (*Thermal InfraRed*) spectral region, is in its testing phase. They are both written in the IDL language (ENVI environment) and they can elaborate images of all principal spaceborne sensors or of customized ones.

### **Introduzione**

Il lavoro presentato in questo contributo è parte delle attività previste nell'ambito del progetto SRV finanziato dall'ASI, coordinato dall'Istituto Nazionale di geofisica e Vulcanologia (INGV) e al quale partecipano diversi soggetti, fra i quali il Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Civile (DIMEC) dell'Università di Modena e Reggio Emilia.

L'obiettivo principale del progetto SRV è la realizzazione di un sistema prototipale in supporto alla gestione del rischio vulcanico da parte della Protezione Civile, basato sull'uso di dati telerilevati. Tale sistema, attualmente in via di sviluppo, sarà utilizzato anche da utenti non esperti nell'elaborazione delle immagini telerilevate. Conseguentemente molte delle operazioni di pre-elaborazione ed elaborazione necessarie per l'estrazione dalle immagini delle informazioni richieste devono essere rese praticamente automatiche o comunque con interazione minima da parte dell'utente. Una delle fasi di pre-elaborazione più critiche, in questo senso, è rappresentata dalle correzioni atmosferiche e topografiche (cambio di illuminazione). Infatti, per ottenere delle

immagini satellitari adeguatamente corrette dall'effetto generato dall'interazione dell'atmosfera e dalla presenza di un certo rilievo orografico, l'approccio ottimale prevede l'uso di modelli di trasferimento radiativo e il calcolo di fattori geometrici derivabili da DTM, che spesso risultano troppo ostici per un utente non esperto.

In questo contributo vengono presentate due procedure software sviluppate per l'applicazione delle correzioni atmosferiche e topografiche ad immagini satellitari, basate sui modelli di trasferimento radiativo MODTRAN e 6S e sui DTM. Sono state realizzate in modo da potere essere annidate all'interno della catena di elaborazioni previste nel Sistema Rischio Vulcanico (progetto ASI). La prima procedura è un riadattamento del software CIRILLO, sviluppato dagli Autori e già collaudato (Teggi et al., 2005; Musacchio et al., 2007) pensato per le correzioni atmosferiche e topografiche nelle regioni spettrali del visibile-vicino infrarosso. La seconda procedura, tuttora in fase di completamento, copre la restante regione spettrale dell'infrarosso termico e riguarda semplicemente le correzioni atmosferiche.

Entrambe le procedure sono state sviluppate in linguaggio IDL e in ambiente ENVI (Research System Inc., 2005) e possono trattare i principali sensori satellitari attualmente in uso, o ulteriori, sensori definiti dall'utente.

### **Il progetto ASI SRV**

Il progetto ASI-SRV ha come obiettivo quello di sviluppare una versione pre-operativa di un sistema basato sull'analisi dei dati EO (*Earth Observation*) integrati con i dati provenienti dalle reti di monitoraggio a terra, dedicato alla sorveglianza delle aree vulcaniche italiane attive. Tra le diverse presenti in Italia, l'attenzione è rivolta esclusivamente al monte Etna ed all'area dei Campi Flegrei e Vesuvio.

Gli obiettivi che il progetto deve espletare sono di seguito indicati in ordine di importanza:

1. Definire i requisiti utente: l'utente identificato è rappresentato dal Dipartimento della Protezione Civile.
2. Esplorare la capacità di assimilazione dei prodotti da parte degli utenti, ovvero la possibilità per l'utente, di integrare i prodotti generati da questo sistema con una serie di informazioni (GIS- *Geographic Information System*-, o di altra natura) derivate da altri sistemi.
3. Dimostrare l'efficienza temporale per la generazione dei prodotti richiesti rispetto alle funzioni principali del sistema (sorveglianza ed "*early warning*", supporto alla fase sin-eruttiva, supporto alla fase post-eruttiva).
4. Dimostrare la capacità degli algoritmi/modelli utilizzati di generare prodotti/servizi richiesti che rispettino requisiti necessari in termini di accuratezza e precisione.
5. Compiere attività di ricerca e sviluppo finalizzata alla generazione di nuovi parametri/prodotti utili ad aumentare le capacità del sistema.

L'approccio seguito per lo sviluppo del *system concept* proposto nello studio di fattibilità è stato quello di orientarsi verso un sistema, basato su diversi moduli e prodotti, in grado di soddisfare tutte le richieste di osservazione relativamente alle diverse fasi del fenomeno eruttivo (*Knowledge & Prevention, Warning & Crisis e Post Crisis*) tenendo presente i requisiti utente, cioè quello che il Dipartimento di Protezione Civile desidera ottenere come risultato dell'esercizio del sistema.

Data la particolare natura della fenomenologia legata al rischio vulcanico e considerando alcune necessità fondamentali per l'utilizzo operativo dei possibili sistemi applicativi, il sistema deve rispondere alle necessità in termini di pianificazione, operatività e logistica relativamente alle fasi di conoscenza e prevenzione, allarme e gestione della crisi e valutazione del danno.

L'analisi dei dati telerilevati ricevuti dal sistema avviene a valle di un percorso comune a tutti i dati EO che prevede, tra gli altri, un modulo di correzione atmosferica e topografica per le immagini satellitari.

## Correzioni atmosferiche e topografiche di immagini satellitari

### Descrizione del modello

Nel visibile-vicino infrarosso (0.40  $\mu m$  e 2.5  $\mu m$ ) l'atmosfera influenza il dato telerilevato mediante processi di diffusione e di assorbimento. In questa regione spettrale il procedimento sviluppato per le correzioni atmosferiche ricalca, a grandi linee, la metodologia utilizzata dal modello di trasferimento radiativo 6S (Vermote et al., 1997) che a differenza del MODTRAN (Berk et al., 1989), tiene conto anche degli effetti di riflessione ambientale. Inoltre, è stata aggiunta la correzione del cambiamento di illuminazione legato alla topografia.

Supponendo di essere in assenza di nubi e di avere una superficie Lambertiana, la riflettanza  $\rho$  di un pixel ad una determinata lunghezza d'onda, può essere legata alla sua riflettanza apparente  $\rho^*$  dalla relazione [1-a] (Liu et al., 1996; Rahman e Dedieu, 1994; Horn and Sjoberg, 1979; Zagolski e Gastellu-Etchegorry, 1995):

$$\rho = \left[ \frac{\rho^*}{t_g} - \rho_a - \frac{\langle \rho_e \rangle \cdot (t_s^\downarrow + t_m^\downarrow) \cdot t_m^\uparrow}{1 - \langle \rho_e \rangle \cdot s} \right] \frac{(1 - \langle \rho_e \rangle \cdot s)}{(\beta \cdot t_s^\downarrow + t_m^\downarrow) \cdot (t_s^\uparrow + t_m^\uparrow)} \quad [1-a]$$

$$\rho^* = \frac{\pi \cdot L_m}{E_0 d^2 \cos \theta_s} \quad [1-b] \quad \beta = \cos \theta_n + \tan \theta_s \sin \theta_n \cos(\varphi_s - \varphi_n) \quad [1-c]$$

dove:  $\rho^*$  è la riflettanza (adim.) al sensore (o riflettanza apparente) che può essere calcolata attraverso la relazione [1-b];

$L_m$  è la radianza misurata dal sensore in una certa banda ( $W m^{-2} \mu m^{-1} sr^{-1}$ );

$E_0$  è l'irradianza solare esoatmosferica ( $W m^{-2} \mu m^{-1}$ );

$\theta_s$  e  $\theta_v$  sono rispettivamente l'angolo zenitale solare e di vista;

$\varphi_s$  è l'angolo azimutale solare;

$\rho_a$  è la riflettanza atmosferica intrinseca (adim.);

$\langle \rho_e \rangle$  è il valore medio della riflettanza ambientale  $\rho_e$  (adim.) che viene calcolata con il metodo iterativo di Richter (Richter, 1990; Teggi et al., 2005);

$t_g$  è la trasmittanza (adim.) dovuta all'assorbimento dei gas presenti nel cammino sole-superficie-sensore;

$t_s^\uparrow, t_s^\downarrow, t_m^\uparrow, t_m^\downarrow$  sono termini di trasmittanza (adim.) atmosferica per il percorso Sole-superficie

$( )^\downarrow$  e per il percorso superficie-sensore  $( )^\uparrow$  dovuti sia al *single scattering*  $( )_s$ , che al *multiple scattering*  $( )_m$ ;

$s$  è l'albedo sferica dell'atmosfera (adim.);

$\beta$  è il fattore correttivo per il cambio di illuminazione dovuto alla topografia, calcolato attraverso la relazione [1-c] (adim.);

$\theta_n, \varphi_n$  sono rispettivamente la pendenza e l'orientazione della superficie (pixel);

$d$  è il fattore di correzione dell'irradianza solare esoatmosferica che tiene conto della variazione di distanza Terra-Sole (adim.).

I termini atmosferici che compaiono nelle equazioni [1] sono calcolati per la fascia di quote di interesse, ogni 100 m, utilizzando i modelli di trasferimento radiativo 6S e MODTRAN e sono dipendenti dalla lunghezza d'onda ad eccezione dei termini geometrici. Una presentazione più completa delle equazioni [1] e una discussione sull'importanza dell'uso contemporaneo dei modelli di trasferimento radiativo può essere reperita nei lavori di Bogliolo et al. (2004), Teggi et al. (2001) e Bogliolo et al. (1998).

Il passaggio da valori spettrali continui ( $f(\lambda)$ ) al valore per una specifica banda  $b$  del sensore considerato ( $f_b$ ) è dato dalla relazione [2]:

$$f_b = \frac{\int_{\lambda} f(\lambda) E_0(\lambda) \Phi_b(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda} E_0(\lambda) \Phi_b(\lambda) d\lambda} \quad [2]$$

dove:  $\Phi_b(\lambda)$  è la funzione risposta della banda  $b$ ;

$E_0(\lambda)$  è l'irradianza solare esoatmosferica spettrale.

Nella regione spettrale dell'infrarosso termico ( $3 \mu m - 15 \mu m$ ) la radianza ricevuta dal sensore è esprimibile in funzione della radianza emessa dal suolo tramite la relazione (Gillespie et. al, 1999):

$$L_m(\lambda) = L_u(\lambda) + \varepsilon(\lambda) \frac{B(\lambda, T_s)}{\pi} t_g^\uparrow(\lambda) + \frac{[1 - \varepsilon(\lambda)]}{\pi} E_d(\lambda) t_g^\uparrow(\lambda) \quad [3]$$

dove:  $L_m$  è la radianza misurata dal sensore ( $W m^{-2} \mu m^{-1} sr^{-1}$ );

$L_u$  è la radianza emessa dall'atmosfera verso il sensore ( $W m^{-2} \mu m^{-1} sr^{-1}$ );

$E_d$  è l'irradianza emessa dall'atmosfera verso la superficie ( $W m^{-2} \mu m^{-1}$ );

$B$  è l'exitanza di corpo nero (funzione di Planck,  $W m^{-2} \mu m^{-1}$ );

$t_g^\uparrow$  è la trasmittanza atmosferica del cammino superficie-sensore dovuta all'assorbimento (adim.);

$\varepsilon$  e  $T_s$  sono l'emissività e la temperatura della superficie (adim.,  $K$ );

Poiché gli effetti atmosferici che influenzano il dato telerilevato in questa regione spettrale sono essenzialmente dovuti agli assorbimenti molecolari, i termini di correzione atmosferica (trasmittanza e radianze atmosferiche) sono calcolati, per la fascia di quote di interesse, ogni 100  $m$ , usando unicamente il MODTRAN. Anche in questo caso i valori alle singole lunghezze d'onda sono riportati a valori relativi ad una specifica banda del sensore mediante una relazione [4] analoga all'equazione [2]:

$$f_b = \frac{\int_{\lambda} f(\lambda) \Phi_b(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda} \Phi_b(\lambda) d\lambda} \quad [4]$$

Differentemente da quanto avviene nella regione del VNIR, nella quale la procedura fornisce il valore di riflettanza corretta, in questo caso lo scopo principale della procedura non è quello di calcolare il valore corretto dagli effetti atmosferici della temperatura superficiale, bensì quello di fornire i termini di correzione atmosferica richiesti dagli algoritmi di separazione temperatura-emissività (*TES, Temperature and Emissivity Separation*, Gillespie et al., 1999). In alternativa, la procedura può calcolare il valore di temperatura di brillantezza al sensore (o temperatura apparente) ( $T_{ba}$ ,  $K$ -equazione [5-a]-) oppure la radianza (equazione [5-b]) emessa dalla superficie nell'ipotesi di corpo nero ( $L_{sb}$ ,  $W m^{-2} \mu m^{-1} sr^{-1}$ ), date rispettivamente dalle relazioni:

$$T_{ba} = c_2 \left[ \lambda \ln \left( \frac{c_1}{\pi \lambda^5 L_m} + 1 \right) \right]^{-1} \quad [5-a]$$

$$L_{sb}(\lambda) = [L_m(\lambda) - L_u(\lambda)] / t_g^\uparrow(\lambda) \quad [5-b]$$

dove:  $c_1$  e  $c_2$  sono la prima e la seconda costante radiativa della funzione di Planck.

### Struttura della procedura

In Figura 1 è riportato lo schema della procedura per le correzioni atmosferiche e topografiche nel VNIR. La procedura si articola in tre blocchi principali: Input-utente, Moduli di calcolo e Risultati.

**Input utente.** In questo blocco vengono definiti diversi parametri fra i quali: sensore, data e tempo di acquisizione, angoli di ripresa e angolo solare; immagine telerilevata da correggere in radianza al sensore; parametri atmosferici (profili verticali, contenuto di vapore acqueo, aerosol, ...), geometrici e spettrali per i modelli di trasferimento radiativi; modello digitale del terreno coregistrato all'immagine telerilevata; parametri per la procedura di correzione dell'effetto di adiacenza (Bogliolo et al. 2004).

**Moduli di calcolo.** Questo blocco è formato dalla concatenazione dei moduli IDL per le correzioni atmosferiche e topografiche che possono essere riassunti in: estrazione delle funzioni risposta del sensore e calcolo dello spettro solare esoatmosferico nelle varie bande; modulo per il calcolo della riflettanza apparente al sensore; modulo per

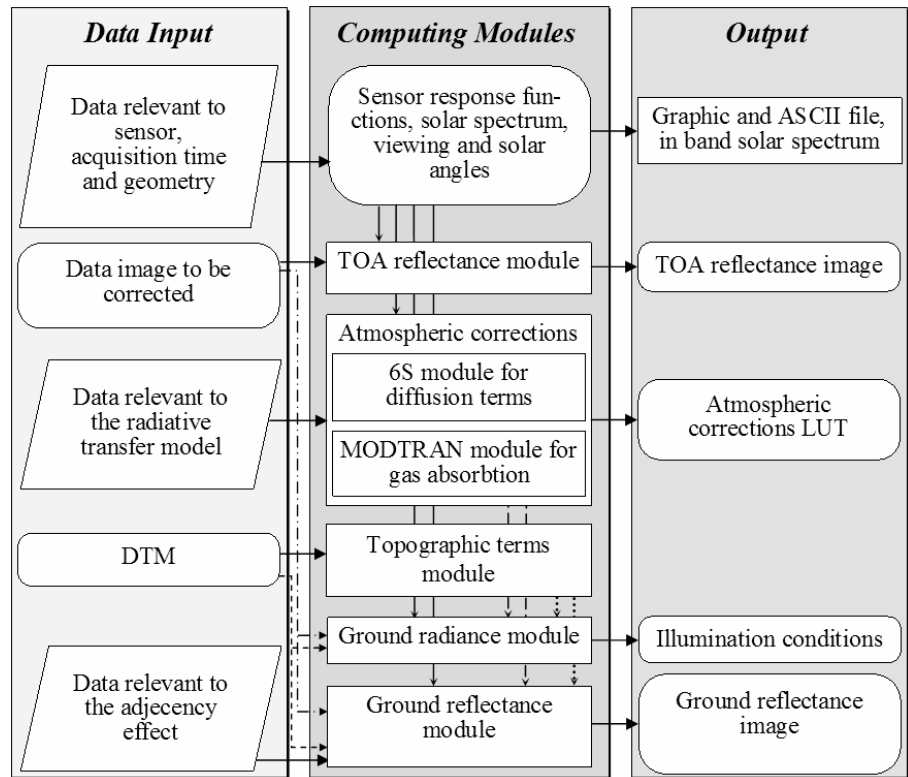


Figura 1 - Correzioni atmosferiche e topografiche nel VNIR

l'impostazione dei parametri di input, della gestione dei run e per l'estrazione dei risultati dei modelli di trasferimento radiativo 6S e MODTRAN; modulo per il calcolo d'illuminazione  $\beta$  [1-c]; moduli per il calcolo della radianza al suolo e della riflettanza superficiale.

**Risultati.** Questo blocco comprende i principali output della procedura: tabella dei centri banda e della radianza solare esoatmosferica in banda; riflettanza al sensore (immagine); LUT (Look Up Table) dei termini di correzione atmosferica in banda calcolati ogni 100 m di quota; fattore di illuminazione

(immagine); riflettanza superficiale corretta (immagine).

In Figura 2 è riportato lo schema della procedura per le correzioni atmosferiche nel TIR. Anche questa procedura si articola in tre blocchi: Input-utente, Moduli di calcolo e Risultati.

**Input utente.** In questo blocco vengono definiti diversi parametri fra i quali: sensore e angolo di ripresa; immagine

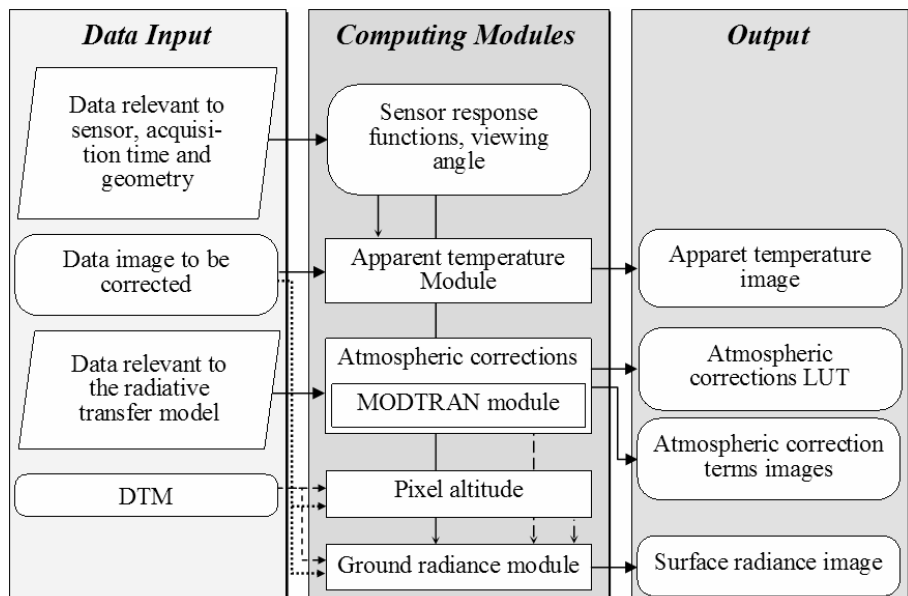


Figura 2 - Correzioni atmosferiche nel TIR

telerilevata da correggere in radianza al sensore; parametri atmosferici (profili verticali, contenuto di vapore acqueo, ...), geometrici e spettrali per il MODTRAN; modello digitale del terreno coregistrato all'immagine telerilevata.

**Moduli di calcolo.** Questo blocco è formato dalla concatenazione dei moduli IDL per le correzioni atmosferiche che possono essere riassunti in: estrazione delle funzioni risposta del sensore; modulo per il calcolo della temperatura apparente al sensore; modulo per l'impostazione dei parametri di input, della gestione dei *run* e per l'estrazione dei risultati del MODTRAN; modulo per il calcolo della radianza al suolo.

**Risultati.** Questo blocco comprende i principali *output* della procedura: temperatura di brillanza al sensore (immagine); LUT dei termini di correzione atmosferica in banda calcolati ogni 100 m di quota; termini di correzione atmosferica per ogni pixel (immagini); radianza superficiale (immagine).

## Conclusioni

In questo contributo sono state presentate due procedure di pre-elaborazione di immagini satellitari inserite nella catena di elaborazione progettata per il Sistema Rischio Vulcanico. La prima procedura ha lo scopo di apportare le correzioni atmosferiche e topografiche alle immagini acquisite nella regione spettrale VNIR ed è un rielaborazione di un software già collaudato (CIRILLO) e tutt'ora in uso nelle linee di ricerca seguite dagli Autori. La seconda procedura, attualmente ancora in fase di sviluppo e collaudo, è mirata alle correzioni atmosferiche dei dati telerilevati nella regione del TIR. Nei prossimi mesi di attività, terminato lo sviluppo software della seconda procedura, esse saranno collaudate nelle condizioni di utilizzo finali previste dal progetto e cioè inserite all'interno del sistema prototipale SRV ed utilizzate da un utente generico (non necessariamente esperto in telerilevamento).

## Bibliografia

- Musacchio M., Amici S., Teggi S., Buongiorno M.F., Sgavetti M., (2007). Immagini satellitari ASTER: studi territoriali, *Rivista Italiana di Telerilevamento*, in stampa.
- Research System Inc. (2005), *Interactive Data Language*, URL:<http://www.rsic.com/idl>, visitato il 16/09/2005.
- Teggi S., Musacchio M., Buongiorno M. F. (2005), Procedura con interfaccia-utente grafica per le correzioni atmosferiche di immagini satellitari, *Atti della 9<sup>a</sup> conferenza nazionale ASITA*, cd room
- Bogliolo M.P., Teggi S., Buongiorno M.F., Pugnaghi S. and Corradini S. (2004), Inspecting MIVIS capabilities for surface characterization: evaluation and analysis of VNIR-SWIR data, *International Journal of Remote Sensing*, 29, 3769-3797.
- Teggi S., Pugnaghi S., Buongiorno M.F., Bogliolo M.P., Corradini S., Lombardo L., Merucci L. (2001), Correzioni atmosferiche dei dati MIVIS, *Rivista Italiana di Telerilevamento*, 20/21, 91-97, Sept. 2000 – Gen. 2001.
- Bogliolo, M.P., Teggi S., Buongiorno M.F., Pugnaghi S., (1998), *Retrieving ground reflectance from MIVIS data: a case study on Vulcano island (Italy)*, Proc. of 1st EARSeL Workshop on IMAGING SPECTROSCOPY, Remote Sensing Lab., Univ. of Zurich, Switzerland, 6-8 October 1998, pp. 403-416
- Gillespie A. R., Rokugawa S., Hook S. J., Matsunaga T., Kahle A. B., (1999) Temperature/Emissivity Separation Algorithm Theoretical Basis Document, Version 2.4, *Algorithm Theoretical Basis Document ATBD-AST-05-08*, NASA, <http://eosps0.gsfc.nasa.gov>.
- Vermote E. F., Tanré D., Deuzé J. L., Herman M. e Morcrette J. J. (1997), Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S): user guide, version 2, *University of Maryland, Dept. Of Geography / Laboratoire d'Optique Atmospherique*.
- Liu C.H., Chen A. J. e Liu G. R. (1996), An image-based retrieval algorithm of aerosol characteristics and surface reflectance for satellite images, *Int. J. Remote Sensing*, 17: 3477-3500.
- Zagolski F. e Gastellu-Etchegorry J. P. (1995), Atmospheric correction of AVIRIS images with a procedure based on the inversion of the 5S model, *Int. J. Remote Sensing*, 16, 3115-3146.
- Rahman H. e Dedieu G. (1994) - SMAC: a simplified method for the atmospheric correction of satellite measurements in the solar spectrum, *Int. J. Remote Sensing*, 15, 123-143.
- Richter R. (1990), A fast atmospheric correction algorithm applied to Landsat TM images, *Int. J. Remote Sensing*, 11, pp. 159-166.
- Berk A., Bernstein L.S. e Robertson D.C. (1989), MODTRAN: a moderate resolution model for Lowtran7, *GL-TR-89-0122, AFG Lab., Hanscom Air Force Base, MA 01731-5000, USA*.
- Horn B. K. P. e Sjöberg R. W. (1979) - Calculating the reflectance map, *App. Optics*, 18, num. 11, 1770-1779.