

Una nuova procedura per le correzioni atmosferiche: applicazione sulla Solfatara di Pozzuoli

Massimo Musacchio¹, Stefania Amici¹, Sergio Teggi², Loredana Pompilio³,
Maria Sgavetti³ e Fabrizia Buongiorno¹

¹INGV, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, via Vigna Murata 605 - 00143 Roma, Italia.

E-mail:

²Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Civile, Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia,
via Vignolese 905 - 41100, Italia.

³Università degli Studi di Parma, via Università 12 - 43100 Parma, Italia.

Riassunto

Il presente lavoro si prefigge di verificare le potenzialità di una nuova procedura per le correzioni atmosferiche denominata CIRILLO. Inoltre si vuole verificare la capacità di discriminare le specie mineralogiche che compongono la superficie della Solfatara di Pozzuoli (Napoli) attraverso dati multispettrali da piattaforma satellitare, confrontandoli con misure iperspettrali eseguite *in situ* ed in laboratorio. Delle 10 stazioni di misura eseguite *in situ* viene presa in considerazione quella per la quale sono stati condotti le analisi minero-petrografiche del campione prelevato. A tal fine è stato condotto uno studio preliminare sulla composizione minero-petrografica di un campione raccolto su un'unità omogenea di territorio. Il campione è stato sottoposto ad analisi XRF (fluorescenza a raggi-X), XRD (diffrattometria a raggi-X) e chimica presso il Dipartimento di Mineralogia dell'Università di Padova. Le analisi condotte hanno fornito come indicazione la presenza di opale. Lo spettro di questo campione è stato acquisito in riflettanza bidirezionale utilizzando uno spettrometro FieldSpec Pro nel laboratorio di spettroscopia dell'INAF-IASF (Roma) ed a sua volta confrontato con le misure eseguite in condizioni ambientali.

Parole chiave: correzioni atmosferiche, dati iperspettrali, dati multispettrale, mineralogia

A new atmospheric correction procedure: Solfatara di Pozzuoli test case

Abstract

This paper describes CIRILLO, a new software for the correction of spaceborne images acquired in the VIS-SWIR spectral range. Moreover the capability to retrieve minerals composing the Solfatara di Pozzuoli surface using ASTER multispectral data is shown. In order to identify the mineralogical composition of the collected sample, mineralogy analysis (X-ray fluorescence and X-ray diffraction) have been done. The reflectance spectra of the collected sample, obtained using a FieldSpec Pro spectrometer (INAF-IASF) has been compared with measurements performed directly on the Solfatara di Pozzuoli using a portable ASD-Fieldspec spectrometer.

Keywords: atmospheric correction, hyperspectral data, multispectral data, mineralogy

Introduzione

Il principio del Telerilevamento si basa sulla capacità di differenziare il maggior numero di elementi od oggetti sul territorio (suolo, vegetazione, acqua, strutture antropiche, ecc.) descrivendo e classificando le risposte spettrali cui sono sensibili i diversi sensori, compati-

bilmente con la risoluzione spaziale e la qualità delle correzioni atmosferiche ed orografiche apportate. Le correzioni atmosferiche ed orografiche delle immagini telerilevate rappresentano uno dei passaggi di pre-elaborazione più impegnativi ma necessari per potere procedere a valutazioni quantitative delle immagini stesse. Le metodologie per effettuare questo tipo di correzioni sono varie ed i principali fattori che le differenziano sono l'intervallo spettrale considerato, l'accuratezza desiderata e la difficoltà di applicazione degli algoritmi. Il primo fattore determina la definizione dei termini di sorgente ed i fenomeni di interazione radiazione elettromagnetica - atmosfera-superficie da considerare. Gli altri due fattori sono contrapposti: gli algoritmi semplici, di facile e veloce applicazione, generalmente producono correzioni atmosferiche poco accurate e viceversa.

Solitamente le difficoltà che si incontrano utilizzando algoritmi che producono correzioni atmosferiche soddisfacenti sono di due tipi: quelle legate alla complessità degli algoritmi e quelle legate all'utilizzatore. Nel primo caso le difficoltà sono dovute al fatto che gli algoritmi sono spesso basati sull'uso di modelli di trasferimento radiativo il cui impiego è notoriamente complesso. Le difficoltà più strettamente legate all'utilizzatore consistono nel fatto che questa figura è molto spesso rappresentata da una persona che non ha conoscenze molto approfondite sui fenomeni di trasferimento radiativo o più in generale della fenomenologia che entra in gioco in questo contesto.

Sulla base di queste premesse, si è cercato di sviluppare una procedura completa dal punto di vista della modellistica del trasferimento radiativo ma allo stesso tempo di facile utilizzo grazie alla costruzione di un'interfaccia grafica che guida l'utente attraverso le varie fasi di elaborazione. Sia la procedura che l'interfaccia grafica sono state sviluppate in ambiente IDL/ENVI. Lo scopo di questo lavoro è la validazione della procedura denominata CIRILLO, già applicata, con successo su dati iperspettrali acquisiti sia da piattaforma spaziale [Musacchio et al., 2006] sia da piattaforma aerea [Buongiorno et al., 1999]; in questo test case è applicata su dati multispettrali ASTER.

CIRILLO: la procedura

La procedura sviluppata è concepita per apportare le correzioni delle immagini telerilevate nella regione dello spettro elettromagnetico compresa tra 0,40 μm e 2,5 μm . In questa regione spettrale l'atmosfera influenza il dato telerilevato sia tramite processi di diffusione che di assorbimento. In questo caso il procedimento sviluppato per le correzioni atmosferiche utilizza il modello di trasferimento radiativo 6S [Vermote et al., 1997a], che tiene conto anche degli effetti di riflessione ambientale ed il modello di trasferimento radiativo MODTRAN [Berk et al., 1989]. E' stata inoltre aggiunta la correzione del cambiamento di illuminazione legato all'orografia. Pur non dilungandoci sulle peculiarità della procedura di calcolo alcuni aspetti specifici meritano una particolare attenzione. La relazione che descrive il modello di trasferimento radiativo di base utilizzato è [1]:

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

Dove:

ρ^* : riflettanza al sensore (o apparente), a sua volta data dalla:

$$\rho^* = \frac{\pi L_m}{E_0 \cos(\theta_s)}$$

dove L_m è la radianza misurata dal sensore e E_0 è l'irradianza solare esoatmosferica;

ρ : riflettanza del pixel;

t_g : trasmittanza dovuta all'assorbimento dei gas;

$t_s^\uparrow, t_m^\uparrow, t_s^\downarrow, t_m^\downarrow$: trasmittanza atmosferica; percorso Sole-superficie, $(\)^\downarrow$, percorso superficie-sensore, $(\)^\uparrow$, dovuto sia al *single scattering*, $(\)_s$, che al *multiple scattering*, $(\)_m$;

ρ_a : riflettanza atmosferica intrinseca;

$\langle \rho_e \rangle$: riflettanza ambientale; riflettanza media dei pixel nell'intorno di quello visto dal sensore;

s : albedo sferica dell'atmosfera;

β : $\cos\theta_n + \tan\theta_s \sin\theta_n \cos(\phi_s - \phi_n)$ è fattore correttivo per il cambio di illuminazione dovuto all'orografia;

θ_n, ϕ_n : pendenza e l'orientazione della superficie;

θ_s, ϕ_s : angolo zenitale solare e angolo zenitale di vista.

All'interno della procedura i moduli che eseguono le correzioni atmosferica ed orografica tengono conto che:

- 1) i contributi atmosferici dovuti alla diffusione atmosferica sono stati calcolati ogni 2,5 nm con il 6S, mentre la trasmittanza atmosferica dei gas è stata calcolata ogni cm^{-1} con il MODTRAN.
- 2) i termini atmosferici riportati nell'Equazione [1] sono grandezze "in banda" (significative per l'intero intervallo spettrale ricoperto della specifica banda considerata), mentre coi modelli 6S e MODTRAN sono calcolate delle grandezze spettrali, ogni 2,5 nm oppure ogni cm^{-1} . La trasformazione da grandezza spettrale ($f(\lambda)$) a grandezza "in banda" (f_b , dove b indica la banda) avviene tramite una relazione frequentemente utilizzata nella modellizzazione delle correzioni atmosferiche [p.e. Rahaman e Dedieu, 1994; Richter, 1997; Vermote et al., 1997b]:

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

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

- 3) il termine di riflettanza ambientale è calcolato col metodo iterativo descritto da Richter [1990].

I passi principali della procedura CIRILLO sono rappresentati nel diagramma logico-funzionale riportato in Figura 1. Questo rappresenta sinteticamente:

- a) gli input richiesti all'utente (area a sinistra della Fig. 1);
- b) i moduli dedicati al calcolo delle correzioni atmosferiche e topografiche, alla base della procedura presentata (area centrale della Fig. 1);
- c) la lista dei diversi prodotti dei calcoli stessi (area a destra della Fig. 1).

Area d'indagine

Il complesso vulcanico al quale la Solfatara di Pozzuoli appartiene è un cono di tufo formato a seguito di eruzioni freato-magmatiche che determinano la messa in posto e l'accumulo per esplosioni successive di depositi da flusso e da surge piroclastico, con una componente ridotta di frammenti messi in posto per caduta, spesso secondo traiettorie balistiche.

La solfatara di Pozzuoli si trova all'interno di un'area densamente popolata ed ha avuto storicamente diversi periodi di attività; la più recente attività esplosiva risale al 1538 (formazione di Monte Nuovo) [Rosi e Santacroce, 1984; Di Vito et al., 1987; Rosi e Sbrana, 1987].

I campi flegrei, a cui appartiene la caldera della Solfatara di Pozzuoli sono anche caratteriz-

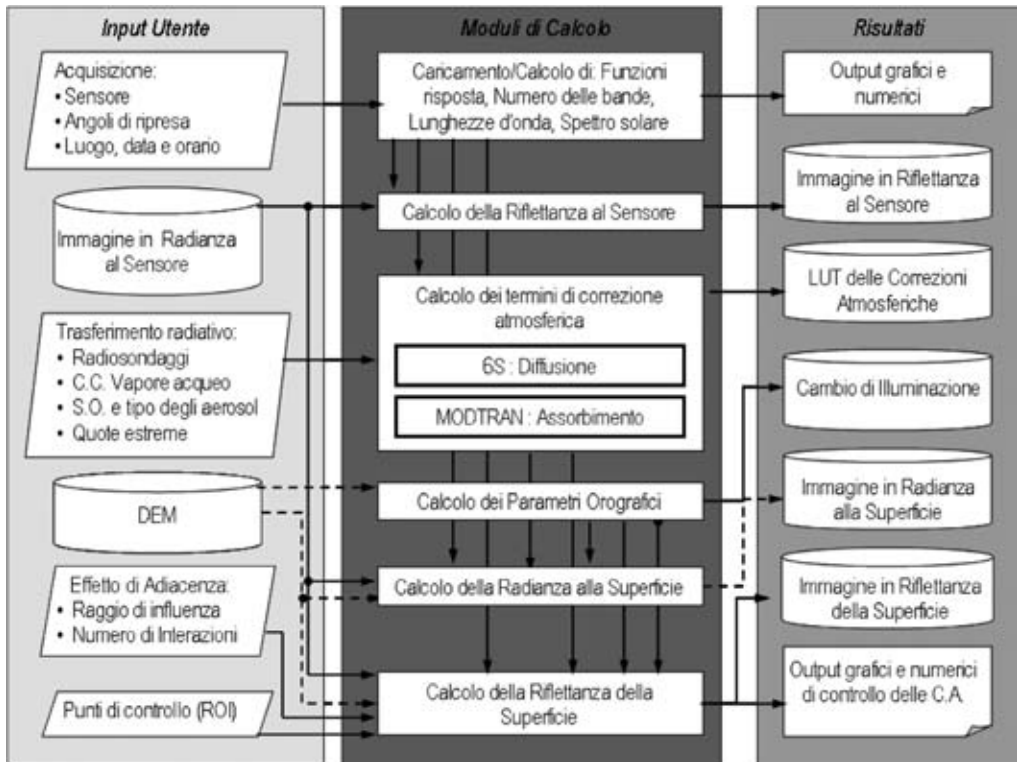


Figura 1 - Diagramma logico funzionale della procedura CIRILLO: L'area a sinistra racchiude i moduli di input con le informazioni richieste all'utente, l'area centrale racchiude il vero e proprio nucleo di calcolo e l'area a destra racchiude i risultati delle procedure di calcolo.

zati periodicamente da bradisismo le cui più recenti crisi sono quelle del 1969-1972 e 1982-1984. Durante quest'ultimo periodo è stato registrato un massimo sollevamento di circa 1.8 m, diverse migliaia di terremoti poco profondi (< 4 km) ed ha provocato l'evacuazione di circa 40.000 persone [Barberi et al., 1984]. In coincidenza di questo periodo di sollevamento si è anche registrata l'apertura di una frattura, orientata in direzione circa NE-SW, larga circa 0,7 m all'interno della Solfatarà stessa [Rosi e Sbrana, 1987].

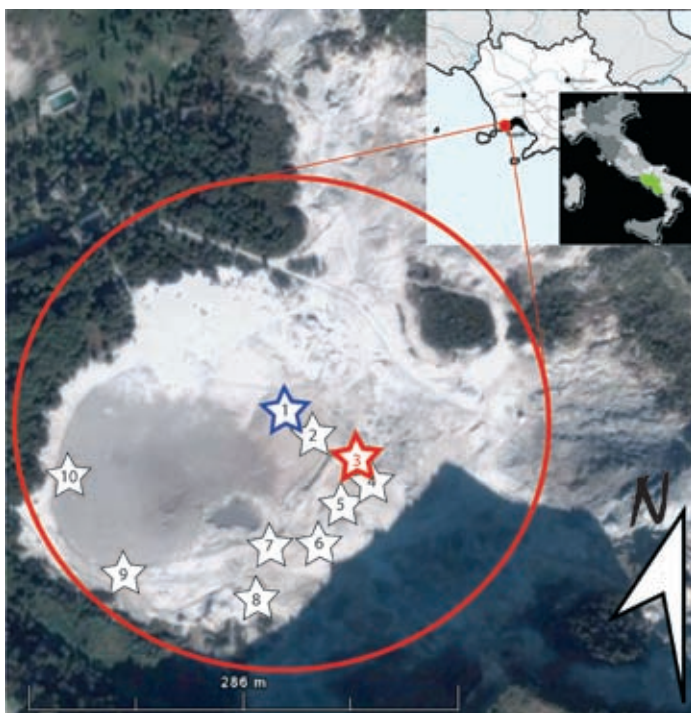
Strategia di campionamento

Il 25 ottobre 2006 sono state eseguite una serie di misure sulla Solfatarà di Pozzuoli, utilizzando lo spettrometro Field Spec Pro. Si tratta di uno spettrometro da campagna a fibra ottica che opera nel range spettrale di 250-2500 nm con una risoluzione spettrale massima di 3 nm.

Lo strumento è dotato di un sistema di calibrazione interna; le operazioni di calibrazione-ottimizzazione sono eseguite preferibilmente ad ogni ciclo di misura od in corrispondenza di eventuali variazioni delle condizioni ambientali. Un computer portatile gestisce le procedure di acquisizione dello strumento permettendo di misurare la *dark current* ed impostare le modalità di acquisizione per la radianza o la riflettanza. Le condizioni meteorologiche durante le misure erano ottime, con cielo sereno.

Le misure sono state effettuate in 10 differenti siti, la cui posizione è stata rilevata mediante GPS Garmin eTrex SUMMIT collegato al computer dedicato alla gestione dell'acquisizione dello spettrometro attraverso una porta USB. La precisione del posizionamento al momento

Figura 2 - Disposizione geografica dei punti di campionamento all'interno della Solfatara di Pozzuoli in senso orario partendo dal punto indicato con il simbolo di stella blu (da Google-Map, modificata).



della misura era di 15 ft (circa 5 metri). I punti sono stati posizionati a mano su di una mappa estratta da Google-Map, facendo riferimento alle reali coordinate riportate in Tabella 1, con l'intento di coprire il perimetro del cratere (Fig. 2). Per ogni stazione di campionamento sono stati acquisiti 30 spettri.

In Tabella 1 sono riportati i punti ed il numero di spettri acquisiti per un totale di 300 misure. In corrispondenza di ogni punto misurato è stato preso un riferimento fotografico. E' stato anche effettuato un campionamento nel punto N 40° 49' 38.2" E 14° 08' 24.7", oggetto di ulteriori analisi mineralogiche.

Tabella 1 - Localizzazione dei siti di campionamento sui quali sono state effettuate misure per mezzo dello spettrometro portatile ASD-fieldspec. Nella stazione di misura n° 3 è stato prelevato il campione oggetto delle analisi mineralogiche riportate di seguito e riportato nella Tabella 2.

N° Sito	Coordinate	
	Latitudine	Longitudine
1	N 40° 49' 39.5"	E 14° 08' 22.5"
2	N 40° 49' 39.7"	E 14° 08' 23.6"
3**	N 40° 49' 38.2"	E 14° 08' 24.7"
4	N 40° 49' 38"	E 14° 08' 24.5"
5	N 40° 49' 37.1"	E 14° 08' 23.8"
6	N 40° 49' 36.4"	E 14° 08' 23.0"
7	N 40° 49' 36.4"	E 14° 08' 21.7"
8	N 40° 49' 34.5"	E 14° 08' 20.1"
9	N 40° 49' 36.0"	E 14° 08' 16.5"
10	N 40° 49' 37.6"	E 14° 08' 15.7"

Caratterizzazione granulometrica e mineralogico-petrografica

Il campione è stato sottoposto ad analisi XRF (fluorescenza a raggi-X), XRD (diffrazione a raggi-X) e chimica presso il Dipartimento di Mineralogia dell'Università di Padova.

L'analisi XRF ha permesso di determinare la concentrazione degli elementi maggiori (in percentuale in ossido) e in traccia. Le specie del Fe (ferroso e ferrico) sono invece state determinate per via chimica. I risultati di queste analisi sono elencati nella Tabella 2.

Il campione analizzato è estremamente ricco in silice e denota una forte perdita al fuoco (LOI, *loss of ignition*) che sta ad indicare un contenuto in volatili, prevalentemente acqua, molto elevato. Gli altri elementi sono presenti in concentrazioni piuttosto basse.

Questi dati evidenziano che ci troviamo di fronte ad un prodotto costituito in prevalenza da silice, piuttosto ricca in H₂O ed eventualmente altre fasi volatili.

L'analisi XRD non è stata qui riportata perché non fornisce dati inconfutabili. Tuttavia, l'assenza di picchi risolvibili nel diffrattogramma evidenzia che si tratta di un prodotto amorfo. Le analisi congiunte di fluorescenza e diffrazione potrebbero indicare che probabilmente il materiale campionato è opale (silice idrata amorfa).

La formazione dell'opale, un prodotto di alterazione molto abbondante in queste aree, è dovuta all'azione di fenomeni idrotermali postvulcanici che coinvolgono acque a basso pH (<3,5) in relazione a rocce a chimismo prevalentemente acido, come rioliti, daciti e trachiti, fortemente liscivate dall'acido solforico disciolto nelle acque [De Gennaro et al., 1980]. I fluidi liscivianti esercitano prevalentemente la loro azione su elementi mobili, quali Na, K, Ca, e Al, dei quali il campione è molto impoverito.

Tabella 2 - Concentrazione degli elementi maggiori (in percentuale in ossido) e in traccia analizzati con tecniche XRF e XRD sul campione prelevato nella stazione di misura n° 3.

Maggiori	wt.% oxide	Traccia	ppm
SiO ₂	87,86	Sc	15
TiO ₂	1,11	V	13
Al ₂ O ₃	1,05	Cr	7
Fe ₂ O _{3tot}	0,30	Co	<3
MnO	0,00	Ni	<3
MgO	0,08	Cu	23
CaO	0,07	Zn	<3
Na ₂ O	0,08	Ga	<5
K ₂ O	0,16	Rb	25
P ₂ O ₅	0,05	Sr	37
L.O.I.	8,79	Y	5
Tot	99,57	Zr	594
		Nb	77
FeO	0,26	Ba	1948
Fe ₂ O ₃	0,01	La	<10
		Ce	<10
		Nd	<10
		Pb	29
		Th	3
		U	10

Pertanto, al fine di classificare la composizione della roccia originaria partendo da questo prodotto fortemente alterato, si può utilizzare il diagramma proposto da Winchester e Floyd [1977], basato sulle relazioni di abbondanza e distribuzione degli elementi immobili, quali Ti, Zr, Nb, e Y. Le informazioni ricavate dal diagramma Nb/Y vs Zr/TiO₂ indicano che il campione in esame deriva da un magma a composizione trachitica.

Confronto tra le misure *in situ*, quelle di laboratorio e l'immagine ASTER

Il riconoscimento di specie minerali attraverso l'uso di dati multi/iperspettrali telerilevati rappresenta una tecnica già applicata con buoni risultati [Kruse et al., 1999, 2003; Clark et al., 1990].

Con l'immagine satellitare della Solfatara di Pozzuoli, ottenuta dal sensore ASTER, montato sul satellite della NASA TERRA, sono state analizzate le litologie affioranti, nell'intervallo di lunghezze d'onda comprese tra il VNIR (*visible near infrared*) e lo SWIR (*short wave infrared*). L'immagine utilizzata è stata acquisita dal sensore il 13 Ottobre 2006 ed è stata resa disponibile direttamente al livello 1B, quindi già georiferita alla proiezione UTM, fuso 33 e datum WGS 84.

L'immagine satellitare è stata corretta in accordo con quanto descritto precedentemente ed in Bogliolo et al., [1998] e Teggi et al., [2005], usando un modello digitale del terreno, alla risoluzione di circa 20 m, ottenuto usando i canali 3N e 3B della stessa immagine ASTER. La correzione dell'immagine è stata effettuata sui canali VNIR e SWIR separatamente ed, a seguire, è stata effettuata una fusione delle bande scalando la risoluzione spaziale dello SWIR a quella del VNIR. La correzione atmosferica ed orografica è quindi avvenuta prima del processo di ricostruzione spaziale e spettrale del dato disponibile.

Una volta corretta e georeferenziata l'immagine è stato possibile estrarre lo spettro relativo al sito di campionamento n°3 (Fig. 2). In Figura 3 sono riportati 4 spettri differenti: con il tratto continuo blu è indicato lo spettro acquisito *in situ*; in rosso scuro lo spettro misurato in laboratorio ed ottenuto dal campione prelevato nella stazione n°3, in verde lo spettro estratto dalle librerie disponibili sul software IDL/ENVI. I punti rossi indicano lo spettro ottenuto dai dati ASTER corretti atmosfericamente e topograficamente con CIRILLO. Il confronto tra questi mostra una buona concordanza tra lo spettro misurato *in situ* e quello estratto dai dati ASTER, soprattutto nei primi 4 canali; inoltre mostra un'elevata concordanza tra lo spettro misurato in laboratorio e quello estratto dalle librerie spettrali e riferito ad una composizione mineralogico-petrografica coerente con le analisi effettuate.

Sul campione di Opale sono stati misurati spettri di riflettanza in laboratorio utilizzando uno spettrometro FieldSpec Pro nel laboratorio di spettroscopia dell'INAF-IASF (Roma) nel range spettrale VNIR-SWIR. Lo spettro di questo campione è stato acquisito in riflettanza bidirezionale (angolo d'incidenza = angolo di emergenza = 30°). La Figura 3 mostra la corrispondenza delle bande di assorbimento tra lo spettro misurato in laboratorio e lo spettro di opale (rif. Opal Hyalite TM8896) della libreria spettrale USGS Digital Splib 04 [Clark et al., 1993].

Le curve così ottenute sono state confrontate con lo spettro medio delle 30 misure effettuate *in situ* relativamente al sito di campionamento n°3 (Fig. 2) con quello estratto dall'immagine ASTER della Solfatara di Pozzuoli (Fig. 3). L'analisi delle firme spettrali mette in evidenza un'andamento spettralmente confrontabile anche se attestato su valori assoluti diversi. Questa differenza è fortemente condizionata dalla dimensione del campione misurato ed anche alle condizioni di illuminazione meno omogenee rispetto a quelle naturali: Bogliolo et al., [2004]. Per confronto in Figura 4 è riportato l'andamento spettrale della radianza (Watt/m²*Sr*micron) estratta dall'immagine ASTER prima dell'applicazione della procedura CIRILLO e relativa al sito di misura n° 3 (Fig. 2).

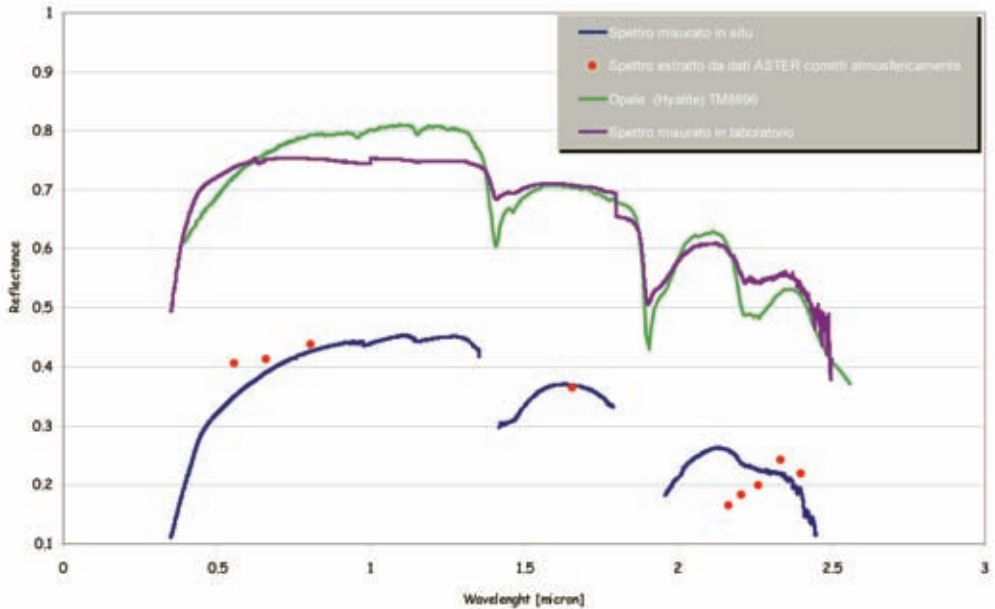


Figura 3 - Confronto tra la firma spettrale acquisita *in situ*, quella acquisita in laboratorio sul campione prelevato dalla stazione di misura n° 3, la firma spettrale dell'opale, ed infine, la risposta spettrale estratta dall'immagine corretta con la procedura CIRILLO.

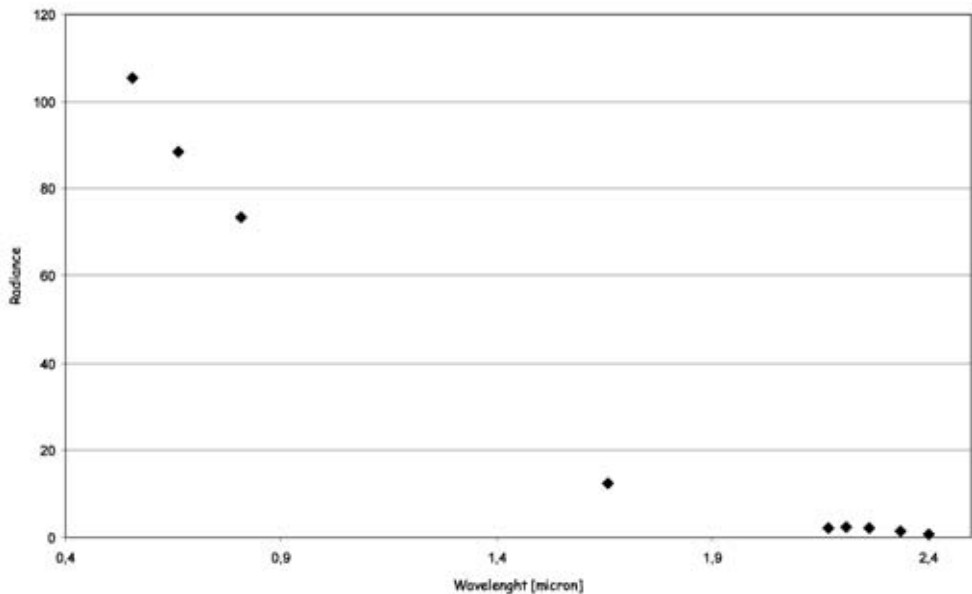


Figura 4 - Spettro in radianza ($\text{Watt/m}^2 \cdot \text{Sr} \cdot \text{micron}$) relativo al punto di misura n°3 (Fig. 2) estratto prima dell'applicazione della procedura CIRILLO.

Conclusioni

Il sensore multispettrale ASTER si è dimostrato un valido strumento per il riconoscimento spettrale di litologie affioranti nella Solfatara di Pozzuoli, anche se il numero limitato di canali non permette il riconoscimento di specifiche componenti mineralogiche distintive.

La caratterizzazione petrografico-mineralogica del campione collezionato e le relative misure di riflettanza condotte in laboratorio forniscono un valido strumento per la definizione della accuratezza delle correzioni atmosferiche e topografiche eseguite con la procedura CIRILLO.

L'applicazione di questa procedura a dati ASTER ha permesso di ottenere buoni risultati nel VNIR e meno buoni nello SWIR. Questo risultato dipende da un non accurato processo di correzione atmosferica e topografica data la coincidenza, almeno nella forma, degli spettri campionati *in situ*, misurati in laboratorio e di riferimento per l'opale.

Ringraziamenti

Si ringraziano Fabrizio Capaccioni e Maria Cristina De Sanctis (INAF-IASF, Roma) per il supporto offerto nella realizzazione delle misure spettrali, e il professor Dario Visonà dell'Università di Padova, per le analisi chimiche.

Bibliografia

- Barberi F., Corrado G., Innocenti F., Luongo G. (1984) - *Phlegraean Fields 1982-1984: brief chronicle of a volcano emergency in a densely populated area*. Bull. Volcanol. 47: 175-185.
- Berk A., Bernstein L.S., 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.
- 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.
- Bogliolo M.P., Teggi S., Buongiorno M.F., Pugnaghi S., Corradini S. (2004) - *Inspecting MIVIS capability to retrieve chemical-mineralogical information: evaluation and analysis of VNIR-SWIR data acquired on a volcanic area*. Int. J. Remote Sensing, 25: 3769-3797.
- Buongiorno M.F., Merucci L., Doumaz F., Salvi S., Bogliolo M.P., Pugnaghi S., Teggi S., Corradini S., Lombroso L., Sterni A., Caltabiano T., Corradini S., Carrere V. (1999) - *MVRRS campaign: MIVIS mission on Sicilian volcanoes and ground measurements*. Quaderni di Geofisica, Istituto Nazionale di Geofisica Ed., Roma.
- Clark R.N., King T.V.V., Klejwa M., Swayze G.A. (1990) - *High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals*. J. Geophysical Research, 95(B8), 12: 653-680.
- Clark R.N., Swayze G.A., Gallagher A.L., King T.V.V., Calvin W.M. (1993) - *The U.S. Geological Survey, Digital Spectral Library: Version 1: 0.2 to 3.0 microns*. U.S. Geological Survey Open File Report 93-592, 1340 pages.
- De Gennaro M., Franco E., Stanzone D. (1980) - *Le alterazioni ad opera di fluidi termali alla Solfatara di Pozzuoli (Napoli) mineralogia e geochimica*. Periodico di Mineralogia, 49: 5-22.
- Di Vito M.A., Lirer L., Mastrolorenzo G., Rolandi G. (1987) - *The 1538 Monte Nuovo eruption (Campi Flegrei, Italy)*. Bull. Volcanol. 49: 608-615.
- Kruse F.A., Boardman J.W., Huntington J.F. (1999) - *Fifteen Years of Hyperspectral Data: northern Grapevine Mountains, Nevada*. In Proceedings of the 8th JPL Airborne Earth Science Workshop: Jet Propulsion Laboratory Publication, JPL Publication 99-17, p. 247-258.
- Kruse F.A., Boardman J.W., Huntington J.F., Mason P., Quigley M.A. (2003) - *Evaluation*

- and Validation of EO-1 Hyperion for Geologic Mapping: in Special Issue, TGARSS, IEEE Trans Geosci. Remote Sens.*, 41(6): 1388-1400.
- Musacchio M., Buongiorno. M.F., Silenzi S., Devoti S., Mazzoli C., Donà S. (2006) - *La Tenuta di Castelporziano (Roma): correlazione fra indagini mineralogico-petrografiche ed immagini Hyperion*. In: atti della 10° conferenza nazionale ASITA: 1475-1480.
- Rahaman H., Dedieu G. (1994) - *SMAC: a simplified method for the atmospheric correction of satellite measurements in the solar spectrum*. *Int. J. Remote Sens.*, 15: 123-143
- Richter R. (1990) - *A fast atmospheric correction algorithm applied to Landsat TM images*. *Int. J. Remote Sens.*, 11: 159-166.
- Richter R. (1997) - *Correction of atmospheric and topographic effects for high spatial resolution satellite imagery*. *Int. J. Remote Sens.*, 18: 1099-1111.
- Rosi M., Santacroce R. (1984) - *Volcanic hazard assessment in the Phlegrean Fields: a contribution based on stratigraphic and historical data*. *Bull. Volcanol.* 47: 359-370.
- Rosi M., Sbrana A. (1987) - *Description of mapped products*. In: Rosi M., Sbrana A. (Eds.), *Phlegrean Fields*. Quaderni de 'La ricerca scientifica', Consiglio Nazionale delle Ricerche, Roma.
- Teggi S., Musacchio M., Buongiorno M.F. (2005) - *Procedura con interfaccia utente grafica per le correzioni atmosferiche di immagini satellitari*. Atti della 9° Conferenza Nazionale ASITA: 1927-1932.
- Vermote E., Tanre' D., Deuze' J.L., Herman M., Morcrette J.J. (1997a) - *Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: an overview*. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 35: 675-686.
- Vermote E., Tanre' D., Deuze' J.L., Herman M., Morcrette J.J. (1997b) - *6S User Guide Version I*. <ftp://kratmos.gsfc.nasa.gov/pub/6S/>.
- Winchester J.A., Floyd P.A. (1977) - *Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements*. *Chem. Geol.*, 20: 325-343.

Manoscritto ricevuto il 18/05/2007, accettato il 8/08/2007.