

# Il progetto Europeo MVRRS per lo studio dei *plumes* vulcanici mediante immagini MIVIS e misure a terra

Maria Fabrizia Buongiorno<sup>(1)</sup>, Sergio Pugnaghi<sup>(2)</sup>, Maria Paola Bogliolo<sup>(3)</sup>, Stefano Corradini<sup>(2)</sup>,  
Valerio Lombardo<sup>(1)</sup>, Luca Merucci<sup>(1)</sup> e Sergio Teggi<sup>(2)</sup>

Il progetto MVRRS (*Mitigation of Volcanic Risk by Remote Sensing*) finanziato dalla Comunità Europea nel triennio 1996-99 ha permesso uno studio dettagliato sui *plumes* emessi da Etna, Stromboli e Vulcano. In tale ambito, nel 1997, il gruppo di ricerca formato dall'Istituto Nazionale di Geofisica e dall'Osservatorio Geofisico dell'Università di Modena ha effettuato una campagna di acquisizione di dati MIVIS sui vulcani siciliani, affiancata da un'estesa campagna a terra necessaria alla successiva analisi dati. Nel presente lavoro è presentato l'insieme dei dati acquisiti nella campagna del 1997, con particolare riferimento alle procedure di controllo e correzione radiometrica effettuate sui dati MIVIS. Saranno inoltre mostrate alcune valutazioni sulle stime di temperatura ed emissività ricavate dai dati MIVIS relativamente alla zona etnea.

## Introduzione

I vulcani attivi spesso presentano un continuo degassamento dai crateri sommitali che immettono nella bassa atmosfera una notevole quantità di ceneri, aerosol e gas (*plumes*). I gas prodotti sono generalmente costituiti da diverse proporzioni di H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> e HCL più altre specie minori. A seconda delle condizioni meteorologiche locali e della generale circolazione di venti, possono anche portare a concentrazioni di gas nocivi o di metalli al suolo pericolose per le popolazioni residenti in aree limitrofe.

L'area test principale è quella relativa al più grande vulcano attivo europeo, il Monte Etna. L'Etna è situato in una zona popolosa della Sicilia orientale ed è tipicamente caratterizzato da attività sommitale quasi continua con sviluppo di un consistente *plume* di degassamento. Saranno comunque studiati anche i *plumes* dello Stromboli ed il *plume* prodotto dalle fumarole del Cratere della Fossa dell'isola di Vulcano.

<sup>(1)</sup> Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

<sup>(2)</sup> Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia, Dip. Ingegneria, sez. Osservatorio Geofisico

<sup>(3)</sup> Istituto Superiore per la Prevenzione e Sicurezza del Lavoro (ISPESL)

Ricevuto il 08/06/00 - Accettato il 06/09/00

*The MVRRS (Mitigation of Volcanic Risk by Remote Sensing) Project, financed by the European Community during years 1996-99, allowed a detailed study of plumes emitted by Etna, Vulcano and Stromboli volcanoes. In the frame of this Project, in 1997, the research team formed by the Istituto Nazionale di Geofisica and by the Osservatorio Geofisico of the University of Modena carried out a campaign of MIVIS data acquisition on Sicilian volcanoes, supported by a ground campaign necessary to collect data for successive image analysis. In this work, the data set acquired during the 1997 campaign is presented, focusing on radiometric correction and checking procedures applied on MIVIS data. Moreover, some evaluations about the estimates of temperature and emissivity obtained from MIVIS data for the Etna area are reported.*

## Il progetto MVRRS

Il progetto MVRRS (*Mitigation of Volcanic Risk by Remote Sensing techniques*), finanziato dall'Unione Europea e coordinato dalla Open University (UK), si è svolto nel triennio 1996-1999 ed è stato dedicato allo sviluppo ed applicazione di moderne tecniche di telerilevamento per lo studio del rischio vulcanico relativo ai vulcani europei, utilizzando sistemi su piattaforme aeree e satellitari sia esistenti che future.

L'obiettivo primario del progetto è stato guidato da due considerazioni: 1) il recente rapido sviluppo della scienza del telerilevamento ed i numerosi e sofisticati sensori sviluppati per il prossimo futuro forniscono un potente e nuovo strumento per il monitoraggio dei vulcani; 2) La crescente densità della popolazione nelle vicinanze di vulcani attivi in Europa indica che il rischio vulcanico è in aumento. Questo rischio può comportare incidenti aerei dovuti a nubi eruttive ma anche pericoli per centri abitati e perdite di vite umane durante escursioni sulle strutture vulcaniche.

Molti dei sensori esistenti su satelliti orbitanti non sono stati realizzati con caratteristiche adatte alle osservazioni vulcaniche. In particolare i sensori con alte risoluzioni spaziali (LANDSAT TM, SPOT HRV) non hanno tempi di ricorrenza adatti all'osservazione di fenomeni con rapida evoluzione temporale e costi troppo elevati per monitoraggi di routine. I satelliti meteorologici sono quelli che forniscono dati a basso costo e disponibili in tempi rapidi,

ma con risoluzioni spaziali molto basse che in generale non permettono l'osservazione dei *plumes* troposferici emessi dal degassamento continuo di crateri sommitali e campi fumarolici. Il progetto MVRRS si è prefisso di studiare le emissioni vulcaniche di varia intensità (da nubi esplosive ad emissioni continue vapore e gas acidi) e di sviluppare dei sistemi di osservazione e monitoraggio basati su diverse tipologie di dati telerilevati e misure di campagna.

Lo scorso anno è stato messo in orbita il satellite americano TERRA (EOS-A1) che trasporta un certo numero di sensori dedicati all'osservazione dei fenomeni terrestri. Tra questi l'ASTER che possiede caratteristiche adatte all'osservazione dei vulcani. Il progetto MVRRS si è pertanto occupato anche di sviluppare conoscenze specifiche per l'utilizzo di questi nuovi sensori in Europa.

Lo studio di immagini telerilevate dei *plumes* vulcanici relativi all'Etna, Stromboli e Vulcano è stato affidato, nel progetto MVRRS, a ricercatori dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologica (INGV), dell'Osservatorio Geofisico dell'Università di Modena (OGUM), dell'Università di Cambridge e L'Università du Littoral. Il gruppo di lavoro si è dedicato allo sviluppo dei seguenti obiettivi:

- 1) Sviluppare metodologie efficaci e stabili per la stima della SO<sub>2</sub> emessa dal plume vulcanico dell'Etna, utilizzando dati telerilevati da sensori aerei iperspettrali e misure atmosferiche;
- 2) Organizzare una campagna area di acquisizione di immagini telerilevate sui vulcani siciliani e la relativa campagna di acquisizione di dati atmosferici ed altri dati di superficie;
- 3) Quantificare il flusso di SO<sub>2</sub> nel tempo al fine di analizzare le variazioni in funzione dell'attività eruttiva dell'Etna;
- 4) Iniziare uno studio di fattibilità per la stima della CO<sub>2</sub> emessa nel plume dell'Etna mediante immagini telerilevate da aereo nell'Infrarosso;
- 5) Trasferire le metodologie sviluppate su dati d'aereo a dati telerilevati da satellite;
- 6) Sviluppare un modello di trasferimento radiativo più accurato per l'ambienti vulcanici utilizzando i codici MODTRAN e 6S.

### Stato della ricerca sulle emissioni gassose con sistemi di telerilevamento

Dal 1993 sono stati eseguiti diversi studi basati su dati telerilevati da aereo con spettrometri ad immagine operanti nel range 0.4-14 micron per stimare la concentrazione ed il flusso di alcuni gas contenuti in *plumes* vulcanici troposferici [Realmuto et al. 1994; Buongiorno et al., 1997; Teggi et al., 1999]. Le tecniche utilizzate si basano sull'utilizzo di codici di trasferimento radiativo LOWTRAN/MODTRAN [Berk et al., 1989] e dati atmosferici ottenuti mediante radiosondaggi locali e misure di radian-

za rilevate da sensori remoti. Gli studi fin qui realizzati hanno dimostrato la validità del metodo per la stima della SO<sub>2</sub> nel *plume* dell'Etna e per il Kilauea (Hawaii) [Realmuto, 1997] e dei relativi flussi.

Recentemente si è cercato di valutare la possibilità di stimare anche il contenuto di CO<sub>2</sub> emesso dall'Etna. La tecnica è stata provata sui dati acquisiti sull'Etna durante la campagna MIVIS 94 [Bianchi et al., 1994; Bogliolo et al., 1996] e successivamente su quelli della campagna MIVIS 97 che hanno dimostrato di avere caratteristiche più idonee al successo di questa metodologia di stima (migliori condizioni atmosferiche e migliore radiometria dei dati). Lo studio ancora in corso sembra dimostrare che sia applicabile per vulcani come l'Etna che emettono *plumes* con un elevatissimo contenuto in CO<sub>2</sub> (35.000 t/d da Allard et al., 1991) in quanto la sensibilità di questi strumenti dipende dalla possibilità di rilevare differenze nei valori di radianza misurati dal sensore. Per altri vulcani la stima della CO<sub>2</sub> e di altri gas emessi in quantità limitate può essere realizzata mediante l'utilizzo di interferometri (FTIR) operanti da terra o da piattaforme aeree (elicottero o aereo) che sono in grado di rilevare la presenza di vari gas vulcanici anche in piccole quantità. Misure condotte con l'FTIR sono state effettuate a Montserrat, Etna, Vulcano, Stromboli e Masaya ed hanno dimostrato che questo strumento può essere utilizzato per misurare i rapporti SO<sub>2</sub>:HCL, HCL:HF ed HF:SiF<sub>4</sub> [Francis et al. 1995, 1996, 1998]. Un FTIR da aereo è stato sperimentato per analizzare i gas di scarico di jet, dimostrando un'elevata sensibilità di misura sia per la stima dei gas che per determinare la temperatura delle emissioni [Tank et al., 1995 e 1997].

Parallelamente allo sviluppo delle metodologie di stima basate su immagini telerilevate sono stati affrontati vari studi sulla dispersione del *plume* al fine di costruire delle carte di rischio dovute a concentrazione elevate di gas letali (SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>) [Pareschi et al., 1997, 1999b] e fornire modelli tridimensionali dello sviluppo di *plumes* gassosi e nubi vulcaniche.

### La campagna MIVIS 1997

Nell'ambito del progetto MVRRS è stata organizzata una campagna multi-disciplinare per acquisire informazioni sulle caratteristiche del *plume* dell'Etna e di raccogliere dati sui parametri di superficie (temperatura, emissività e riflettanza delle diverse superfici del vulcano).

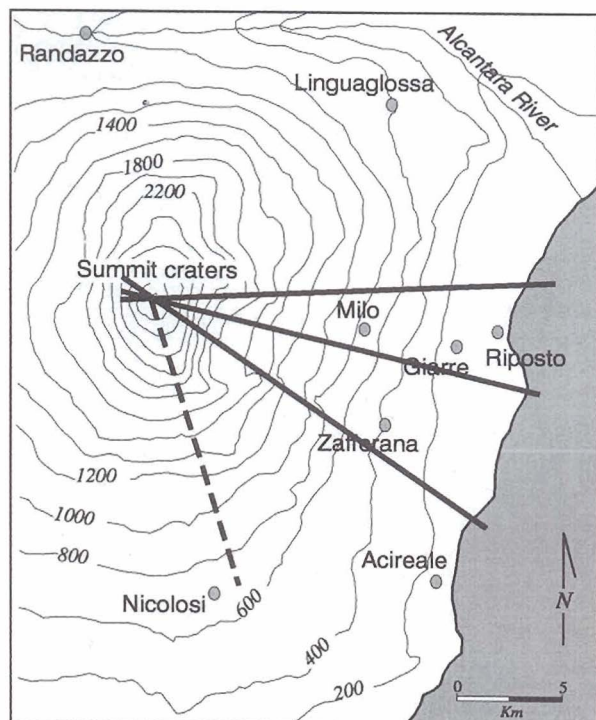
La campagna prevedeva l'acquisizione di diverse strisciate del MIVIS di giorno e di notte su Etna ed Isole Eolie in una finestra temporale di 10 giorni (vedi Tabella 1). I piani di volo sono stati studiati secondo le necessità di ogni particolare osservazione, infatti sia le condizioni climatiche che quelle topografiche hanno richiesto particolari geometrie di volo.

Sull'Etna sono state effettuate 4 missioni durante il giorno ed una di notte al fine di osservare il *plume* di SO<sub>2</sub>. Il

**Tabella 1 - Voli MIVIS 1997**

Area	Obiettivo	N. strisciate	Data	Ora locale	Quota a.s.l.
Etna	SO <sub>2</sub>	4	11/06	9:44-10:15	6500 m
Etna	SO <sub>2</sub>	2	12/06	9:00-10:15	6500 m
Vulcano	Mapping	3	14/06	10:00-10:20	2000/3500 m
Stromboli	Mapping/SO <sub>2</sub>	2	14/06	11:00-11:05	3500 m
Vulcano	Thermal	2	15/06	2:15-3:10	2000/3500 m
Stromboli	Thermal	1	15/06	3:30	3500 m
Etna	Thermal/SO <sub>2</sub>	4	15/06	3:55-4:25	5500 m
Etna	SO <sub>2</sub>	4	16/06	10:25-10:40	5500 m
Etna	SO <sub>2</sub>	3	17/06	9:40-10:00	5500 m

piano di volo generale ha previsto tre strisciate poste radialmente sulla struttura del vulcano. Oltre alle tre strisciate disposte lungo l'asse del *plume* ne è stata aggiunta una quarta per coprire l'area delle misure di calibrazione sul fianco sud-est del vulcano (Fig. 1). La quota di volo era stata fissata inizialmente a 6500 metri s.l.m. e poi modificata a 5500 m s.l.m. per problemi al sistema di registrazione. La risoluzione al suolo delle immagini variava da 6.4 a 13 m (quota di volo 6500 m) e da 4.4 a 11 m (quota di volo 5500 m). L'area coperta da ogni sin-



**Figura 1** - Esempio della disposizione delle strisciate MIVIS per l'Etna: la linea tratteggiata rappresenta la striscia sui siti di calibrazione; quella solida le strisciate lungo l'asse del *plume*.

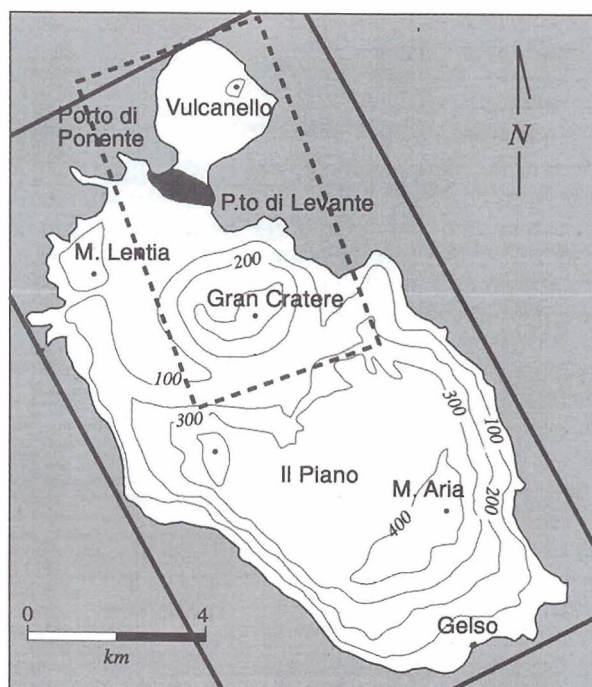
gola *swath* in dipendenza dalla quota topografica e' stata di 7.8 km sulla costa e 3.7 ai crateri (quota di volo 5500 m).

Sulle Eolie è stato fatto un volo diurno e uno notturno su Vulcano e Stromboli. Il piano di volo diurno sull'isola di Vulcano ha previsto una striscia a bassa quota (2000 m s.l.m.) sul Cratere della Fossa e Vulcanello per lo studio dettagliato dei campi fumarolici e due striscie stereoscopiche a 3500 m s.l.m (Fig. 2). Il piano di volo notturno ha previsto una striscia a 2000 m s.l.m. ed una a 3500 m s.l.m. La risoluzione spaziale è stata di 4.-3.3 m (quota di volo 2000 m) e 7-6 m (quota di volo 3500 m); la *swath* e' stata di 4.8 - 4.4 Km.

L'isola di Stromboli è stata sorvolata una volta di giorno ed una di notte a 3500 m con una risoluzione spaziale tra 7 e 5.2 m (Fig. 3).

### Campagna di acquisizione di dati a terra

In concomitanza della campagna MIVIS è stata effettuata un'estesa campagna di acquisizione di dati a terra per la calibrazione e validazione dei dati MIVIS. Molte misure sono state eseguite contemporaneamente ai voli MIVIS e quindi hanno richiesto un notevole sforzo logistico per assicurare il massimo della sovrapposizione con i voli aerei considerando le difficoltà ambientali del vulcano. Oltre alle misure coordinate direttamente dall'ING, dall'OGUM e dall'Istituto Internazionale di Vulcanologia



**Figura 2** - Vulcano: area coperta dal sorvolo MIVIS: linea solida area compresa dal volo a 3500 m di quota; linea tratteggiata area coperta dal volo a 2000 m di quota.



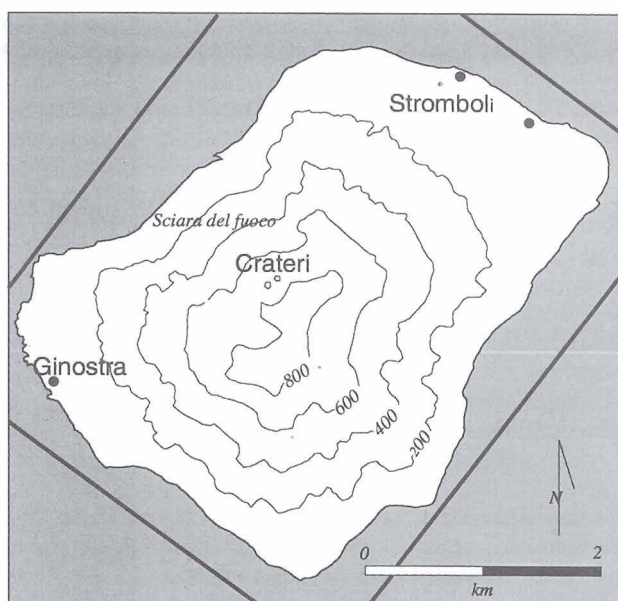


Figura 3 - Stromboli: copertura delle strisciate MIVIS.

di Catania, sono state effettuate misure da Milton Keynes (Open University, U.K.) e da Patrick Allard (LSCE, Laboratoire des Sciences du Climat et Environnement, CEA-CNRS, Orme des Merisiers, France). In particolare

Allard ha effettuato dei voli aerei con campionamento diretto del *plume* di Etna e Stromboli ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}_2$  e particolato) contemporaneamente al MIVIS (i dati sono ancora in corso di studio).

In Tabella 2 è riportato l'elenco delle misure a terra eseguite durante la missione MIVIS, una completa descrizione delle misure e' riportata in Buongiorno et al., 1999.

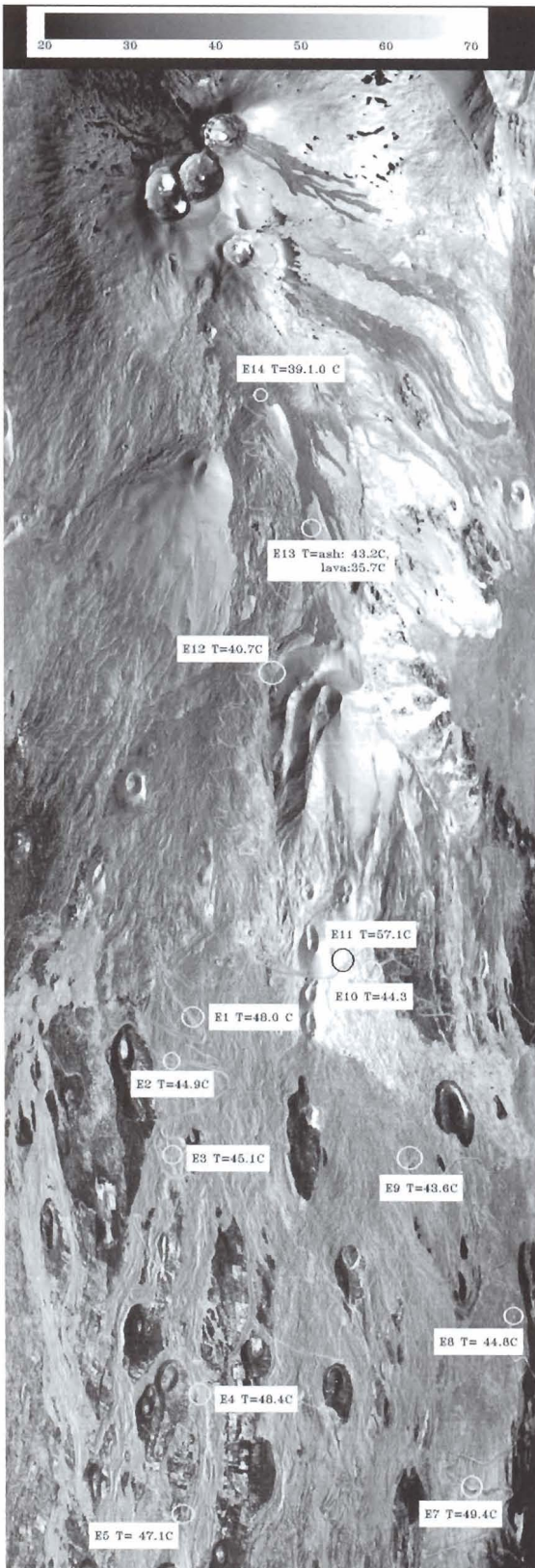
### Misure di temperatura

Le misure di temperatura superficiale sono servite a validare la procedura di calcolo delle temperature superficiali a partire dai dati MIVIS, basata su algoritmi sviluppati da diversi autori [Barducci e Pippi, 1996; Kealy e Hook, 1993; Realmuto, 1990]. Infatti, la stima della temperatura superficiale insieme all'emissività costituiscono i termini di superficie necessari ai fini della stima della concentrazione di  $\text{SO}_2$  nel *plume* [Teggi et al., 1999]. Le misure sono state effettuate per mezzo di un termometro ad infrarosso (EVEREST Intersc. Inc.), programmando l'emissività della superficie a 0.99. Le misure sono state effettuate puntando lo strumento verticalmente verso la superficie alla distanza di 1 metro dal suolo. Per compensare la differenza di dimensione tra il pixel del MIVIS (4-13 m) sono state acquisite 10 misure distribuite nell'area test. Una media delle 10 temperature ha fornito il valore attribuito ad ogni sito (Fig. 4).

L'analisi dei dati acquisiti il 12/06/1997 ha mostrato una

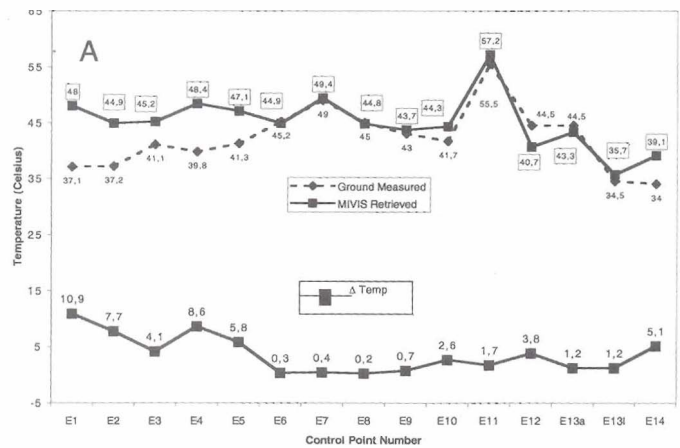
Tabella 2 - Misura a terra effettuate durante i voli MIVIS 1997.

TIPO DI MISURA	UTILIZZO	SITI	COINCIDENZA CON VOLI MIVIS
Profili verticali atmosferici mediante radiosondaggi	Modello del contributo radiativo atmosferico e per il modello 3D del <i>plume</i> etneo; stime di flusso $\text{SO}_2$ .	ETNA VULCANO	SI
Spettri di superfici laviche nel VIS-IR	Caratterizzazione spettrale della superfici interessate dai voli MIVIS, validazione degli algoritmi per il calcolo della riflettanza a partire da dati MIVIS, librerie spettrali di rocce.	ETNA VULCANO	PARZIALE
Misure di temperatura con termometri nell'IR	Misure di temperatura su siti specifici per le calibrazioni dei dati MIVIS, per la validazione dei modelli atmosferici.	ETNA VULCANO	SI
Stime di $\text{SO}_2$ con spettrometro nel TIR	comparazioni con le stime estrapolate con il MIVIS ed il COSPEC	ETNA	SI
Misure di parametri meteorologici al suolo	Parametri atmosferici al livello del suolo, informazioni sulle condizioni meteo alla quota del <i>plume</i> (stazioni installate nell'area sommitale)	ETNA	SI
Misure fotometriche	Informazioni sulle caratteristiche ottiche dell'atmosfera e del <i>plume</i>	ETNA	SI
Misure COSPEC	Stime di riferimento per le concentrazioni di $\text{SO}_2$ stimate dal MIVIS, andamento temporale del flusso di $\text{SO}_2$ emesso dall'Etna.	ETNA VULCANO	PARZIALE
Raccolta di campioni per misure di laboratorio	Acquisizione di spettri nel TIR per la validazione dei dati MIVIS e costruzione di una banca di spettri di emissività di rocce vulcaniche.	ETNA VULCANO	NO

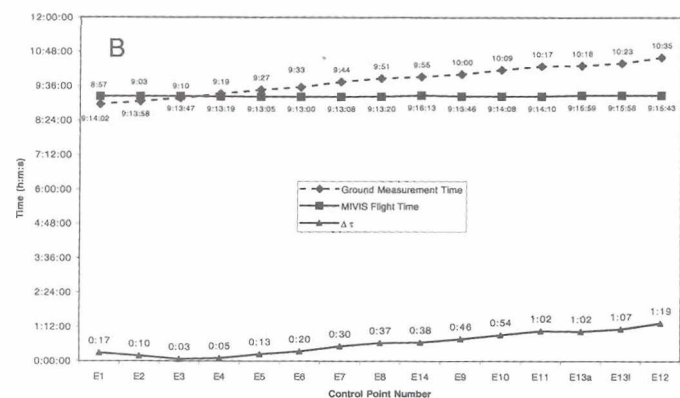


**Figura 4** - Immagine MIVIS dell'Etna che mostra la temperatura diurna relativa al 12/06/1997 sulla quale sono rappresentati punti di controllo sia per la temperatura che per la riflettanza ed emissività (Concessione SMA 528 del 4.11.97).

buona correlazione tra misure a terra e valori stimati dal MIVIS. Nel grafico mostrato in Figura 5a si osserva che all'inizio delle misure le condizioni ambientali (vento in superficie, ombre dei rilievi dovute all'ora dei sorvoli) hanno contribuito a fornire un'elevata differenza tra valori stimati e quelli misurati (Fig. 5 b). Con il trascorrere del tempo e con il progressivo stabilizzarsi delle condizioni termiche della superficie, le misure al terreno mostrano deviazioni molto contenute rispetto a quelle stimate dal



**Figura 5a** - Grafico che mostra l'andamento delle temperature misurate a terra con quelle calcolate dai dati MIVIS, la parte inferiore del grafico mostra la differenza tra la due temperature.



**Figura 5b** - Grafico che mostra i rispettivi orari di misura per le temperature a terra, la parte inferiore mostra le differenze tra i due tempi di acquisizione.

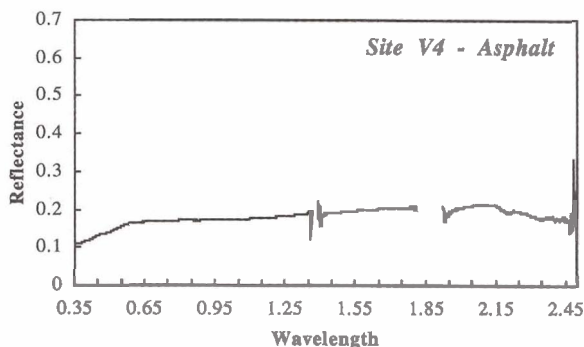


Figura 6a - Spettro di riflettanza medio di un campione di asfalto a Vulcano acquisito con il Fieldspec.

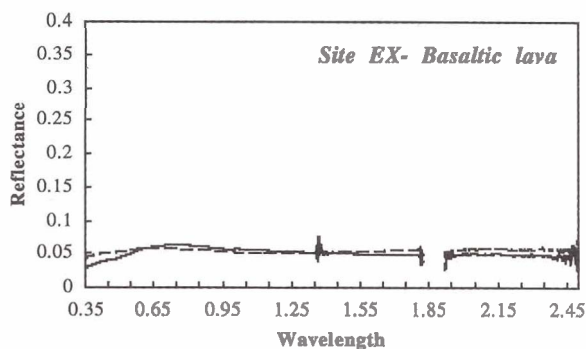


Figura 6b - Spettro di riflettanza relativo alla colata del 1985 dell'Etna acquisito dal Fieldspec; la linea solida è relativa alla superficie alterata; la linea tratteggiata alla superficie fresca.

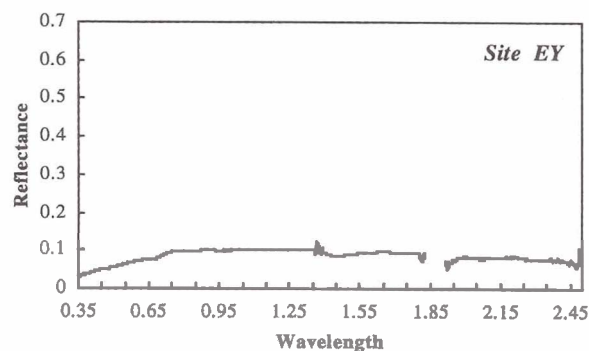


Figura 6c - Spettro di riflettanza acquisito con il Fieldspec e relativo alla colata del 1792 dell'Etna.

MIVIS (Fig. 5a), anche considerando la maggiore differenza di tempo tra le due misure. Le considerazioni sull'instabilità delle temperature misurate a terra e la difficoltà realizzazione di misure contemporanee alla ripresa

delle immagini aeree suggeriscono per le future campagne di validazione dei dati l'installazione di punti di misura fissi con un sistema di registrazione automatico dei dati di temperatura.

### Misure spettrali su rocce vulcaniche

Le misure di spettri di riflettanza sono state effettuate in parte durante la campagna 1997 ed in parte completate successivamente in laboratorio.

Le misure di riflettanza sono state eseguite con il FieldSpec FR (Analytical Spectral Devices Inc.). Lo strumento copre un range spettrale da 350-2500 nm con tre spettrometri separati; il primo ha un passo di campionamento di 1.4 nm; mentre gli altri due hanno un passo di campionamento di 2 nm. Il campo di vista è di 25°.

Gli spettri di riflettanza assoluta (Fig. 6 a,b,c) sono stati ottenuti dal rapporto tra radianza della superficie e radianza di un pannello bianco di riferimento (Spectralon), moltiplicato per la riflettanza assoluta del pannello.

Data la mancanza di strumentazione da campagna, spettri di emissività di superfici laviche nel range 8-14 micron sono stati eseguiti in laboratorio su campioni raccolti sulle colate ben individuabili sulle immagini MIVIS. Gli spettri sono stati successivamente ricampionati sui canali del MIVIS al fine di facilitare la comparazione degli spettri di laboratorio con quelli stimati dalle immagini e confrontati con gli spettri di emissività ricavati dalle immagini.

### Conclusioni

La campagna di misure eseguita nell'ambito del progetto MVRRS ha raccolto una notevole quantità di informazioni sulle caratteristiche atmosferiche e superficiali dei vulcani siciliani al fine di studiare principalmente le emissioni gassose. Il lavoro di comparazione dei diversi dati raccolti non è ancora terminato, soprattutto per quello che riguarda lo studio dei dati campionati da P. Allard. Per quanto riguarda le immagini MIVIS, sono attualmente in fase di studio i dati ripresi nel VIS-IR, per la determinazione dei parametri ottici del plume dell'Etna e possibilmente di Stromboli.

I dati MIVIS hanno costituito un utilissimo banco di prova per lo sviluppo delle procedure di stima della SO<sub>2</sub> e per l'inizio dello studio sulla possibilità di stimare la CO<sub>2</sub> vulcanica; nel prossimo futuro gli algoritmi di stima saranno testati su dati da satellite (ASTER, piattaforma EOS-A1) per dare inizio ad una fase di monitoraggio periodico delle emissioni di SO<sub>2</sub> nel plume etneo.

Nel sottolineare l'importanza delle misure con sistemi di telerilevamento aereo ci auguriamo che il MIVIS possa rappresentare uno dei principali strumenti di indagine e sviluppo della comunità scientifica italiana ed europea; naturalmente ciò implica che lo stato di calibrazione e funzionamento dello strumento debba essere garantito e mantenuto nel tempo.

Nel 2001 è anche prevista una nuova campagna di acqui-



sizione dati sui vulcani siciliani per la sperimentazione di nuovi sensori aerotrasportati nell'ambito di un progetto ASI/ESA.

## Bibliografia

Allard P., Carbonelle J., Dajlevic D., Le Bronec J., Morel P., Robe M.C., Maurenas J.M., Pierret R.F., Martins D., Sabroux J.C., e Zettwoog P. (1991) - *Eruptive and diffusive emission of CO<sub>2</sub> from Mount Etna*. Nature, 351: 387-390.

Barducci A. e Pippi I. (1996) - *Temperature and emissivity retrieval from remotely sensed images using the "Grey Body Emissivity" method*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 34(3): 681-691.

Berk, A., Bernstein L.S. e Robertson D.C. (1989) - *MODTRAN: A Moderate Resolution Model for LOW-TRAN7*. AFGL Technical Report GL-TR-89-0122, USA.

Bianchi R., Marino C.M. e Pignatti, S. (1994) - *Airborne hyperspectral remote sensing in Italy*. Proc. EUROPTO Series 'Recent Advances in Remote Sensing and Hyperspectral remote sensing' SPIE, Roma (Italy), September 27-29 1994, 2318: 29-37.

Bogliolo, M.P., Buongiorno M.F., Salvi S., Teggi S., Pugnaghi S., Abrams M.J., Pieri D.C., Realmuto V.J. e Caltabiano T. (1996) - *Ground measurements of physical parameters at Vulcano Island and Mount Etna in support of the MIVIS remote sensing campaign "Sicilia-94"*. Pub. n.577, Istituto Nazionale di Geofisica, Rome, Italy.

Buongiorno M.F., Bogliolo M.P., Caltabiano T., Carrere V., Corradini S., Merucci L., Pugnaghi S., Salvi S., Sterni A. e Teggi S. (1999) - *MVRRS Campaign: MIVIS mission on Sicilian volcanoes and ground measurements*. Quaderni di Geofisica, 7: 1-90.

Buongiorno M.F., Bogliolo M.P., Salvi S., Teggi S., Pugnaghi S. e Sterni A. (1997) - *Combining optical airborne image data and atmospheric measurements to estimate and map SO<sub>2</sub> in tropospheric volcanic plumes*. Proc. of the 4th International Workshop on Advanced Infrared Technology and Applications, Firenze, Italy, 227-242.

Francis P.W., Burton M., e Oppenheimer C. (1998) - *Remote measurements of volcanic gas compositions by solar occultation spectroscopy*. Nature, 396: 567-570.

Francis P.W., Chaffin C., Maciejewski A.J.H e Oppenheimer C. (1996) - *Remote determination of SiF<sub>4</sub> in volcanic plumes: a new tool for volcano monitoring*. Geophys. Res. Lett, 23: 249-252.

Francis P.W., Maciejewski A., Chaffin C., Oppenheimer C. e Caltabiano T. (1995) - *SO<sub>2</sub> and HCl ratios in the plumes of Mt. Etna and Vulcano determined by Fourier Transform Spectroscopy*. Geoph. Res. Letters, 22: 1717-1720.

Kealy, P.S. e Hook S.J. (1993) - *Separating Temperature and Emissivity in Thermal Infrared Multispectral Scanner Data: Implications for Recovering Land Surface Temperatures*. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 31: 1155-1164.

Pareschi M.T., e Ranci M. (1997) - *Risk evaluation of SO<sub>2</sub> emission at Vulcano island (Sicily)*. Air Pollution V, Modelling, Monitoring and Management., Editors: H.Power, T.Tirabassi, C.A.Brebbia, Computational Mechanics Publications, 323-332.

Pareschi M.T., Ranci M., Valenza M. e Graziani G. (1999) - *The Assessment of Volcanic gas hazard by means of numerical models: an example from Vulcano Island (Sicily)*. Geophysical Research Letters, 26: 1405-1408.

Realmuto V.J. (1990) - *Separating the effects of temperature and emissivity: Emissivity spectrum normalization*. In: Proc. 2nd Thermal Infrared Multispectral Scanner (TIMS) Workshop, pp. 310-316, E.A. Abbots, JPL Publ. 90-55.

Realmuto V.J., Abrams M.J. Buongiorno M.F. e Pieri C.D. (1994) - *The use of multispectral thermal infrared image data to estimate the sulfur dioxide flux from volcanoes: A case study from Mount Etna, Sicily, July 29, 1986*. Journal of Geophysical Research, 99(B1): 481-488.

Realmuto V.J., Sutton A.J. e Elias T. (1997) - *Multispectral thermal infrared mapping of sulfur dioxide plumes: A case study from the East Rift Zone of Kilauea Volcano, Hawaii*. J. Geophys. Res., 102: 15057-15072.

Tank V., Haschberger P., Lindermeir E., e Matthern K. (1995) - *FTIR airborne measurement of aircraft jet exhaust gas emissions under cruise conditions*. Proc. SPIE 2506: 359-367.

Tank V. (1997) - *Propagation of Calibration Errors in FT-IR Emission Spectroscopy of Gases*. Microchimica Acta, Suppl. 14, Springer Verlag 1997, 311-313.

Teggi S., Bogliolo M.P., Buongiorno M.F., Pugnaghi S. e Sterni A. (1999) - *Evaluation of SO<sub>2</sub> emission from Mt. Etna using diurnal and nocturnal MIVIS TIR remote sensing images and radiative transfer models*. Journal of Geophysical Research, 104: 20069-20079.