

2008

AVHotRR
Routine IDL per il monitoraggio di
vulcani attivi attraverso l'analisi
d'immagini satellitari NOAA/AVHRR

Valerio Lombardo

n. 76

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Via di Vigna Murata 605 - 00143 Roma

tel 06518601 • fax 065041181

www.ingv.it



Direttore

Enzo Boschi

Editorial Board

Raffaele Azzaro (CT)

Sara Barsotti (PI)

Mario Castellano (NA)

Viviana Castelli (BO)

Anna Grazia Chiodetti (AC)

Rosa Anna Corsaro (CT)

Luigi Cucci (RM1)

Mauro Di Vito (NA)

Marcello Liotta (PA)

Lucia Margheriti (CNT)

Simona Masina (BO)

Nicola Pagliuca (RM1)

Salvatore Stramondo (CNT)

Andrea Tertulliani - coordinatore (RM1)

Aldo Winkler (RM2)

Gaetano Zonno (MI)

Segreteria di Redazione

Francesca Di Stefano (coordinatore)

Tel. +39 06 51860068

Fax +39 06 36915617

Rossella Celi

Tel. +39 06 51860055

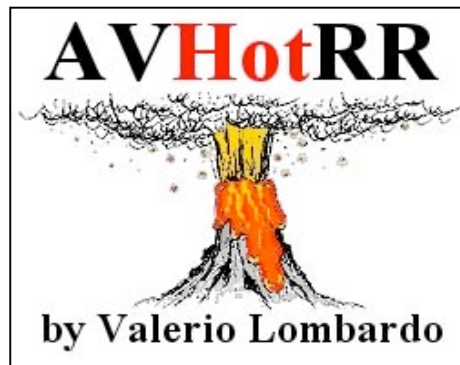
Fax +39 06 36915617

redazionecen@ingv.it

AVHotRR
ROUTINE IDL PER IL MONITORAGGIO DI VULCANI ATTIVI
ATTRAVERSO L'ANALISI D'IMMAGINI SATELLITARI
NOAA/AVHRR

Valerio Lombardo

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia
Roma - CNT



Indice

Introduzione	5
1. La stazione d'acquisizione TERASCAN	5
1.1 Il sensore AVHRR	5
1.2 Acquisizione e processamento dei dati AVHRR	6
1.3 Procedura di monitoraggio dei dati AVHRR in ingresso	7
2. Il programma <i>AVHotRR</i>	7
2.1 Descrizione Generale	8
2.2 Individuazione delle anomalie termiche	9
2.2.1 Creazione maschera per le nubi	9
2.2.2 Creazione maschera per la colata lavica	9
2.2.3 Confronto tra la maschera delle nubi e la maschera della colata	10
2.3 Analisi sub-pixel: stima della temperatura e della superficie lavica	12
2.3.1 Stima della temperatura di background	12
2.3.2 Influenza della temperatura di background sulle soluzioni del sistema	13
2.4 Calcolo del flusso termico e del tasso d'effusione	14
2.5 Invio delle informazioni tramite posta elettronica	15
2.5.1 Descrizione del programma <i>Blat32</i>	15
2.5.2 Struttura del file di <i>alert</i>	16
2.6 File ASCII di Output	17
3. Validazione dei risultati e analisi dell'errore	18
3.1 Confronto con dati satellitari e di terra	18
3.2 Analisi degli errori nel calcolo dei parametri	19
3.2.1 Errori dovuti alle caratteristiche del sensore	20
3.2.2 Errori dovuti al modello termico	20
3.3 Statistica dei falsi allarmi	20
4. Futuri sviluppi ed implementazioni di <i>AVHotRR</i>	21
4.1 Implementazione di nuove funzionalità	21
4.2 Implementazione di nuovi modelli termici	21
4.3 Processamento di dati da altri sensori	22
Ringraziamenti	22
Appendice: Teoria per l'analisi delle anomalie termiche da dati telerilevati	22
Bibliografia	25

Introduzione

I sensori satellitari a bassa risoluzione spaziale possono essere utilizzati per la rilevazione e il monitoraggio delle anomalie termiche collegate alle fasi eruttive dei vulcani. L'elevata frequenza d'osservazione dei sistemi a bassa risoluzione spaziale (da un'immagine al giorno fino ad un'immagine ogni 15 minuti) può rivelarsi di estrema importanza nel monitoraggio dell'evoluzione dei fenomeni in atto. Difatti il segnale associato ai campi lavici attivi è nella maggior parte dei casi ben riconoscibile nelle immagini all'infrarosso (IR) e può essere quindi utilizzato per rilevazione delle fasi eruttive iniziali e per il monitoraggio dell'evoluzione dell'attività effusiva.

La valutazione della temperatura e dell'emissività spettrale della superficie (appendice A) è di notevole interesse in ambito vulcanologico poiché consente di studiare numerosi fenomeni come laghi di lava, fumarole e colate laviche. La tecnica *dual-band* (appendice B) sulle immagini IR viene comunemente usata per il calcolo del flusso termico (Q_{tot}) e del tasso d'effusione (E_r) di colate laviche [Pieri et al., 1990; Oppenheimer, 1991; Oppenheimer et al., 1993; Harris et al., 1999; Flynn et al., 2001; Wright et al., 2001].

Il flusso termico (Q_{tot}) di un'anomalia (appendice C) è funzione di due distinte superfici radianti presenti all'interno del pixel (analisi *sub-pixel*), la superficie occupata dalla lava e quella occupata dal substrato più freddo (background) sul quale scorre la colata stessa. Ciascuna superficie è caratterizzata da una diversa temperatura (rispettivamente indicata con T_{lava} e T_b). Q_{tot} si calcola a partire dalla mappa di temperatura ed è solitamente espresso in watt. Il flusso rappresenta l'energia emessa dalla superficie dell'anomalia all'istante in cui l'immagine satellitare è stata acquisita [Pieri et al., 1990; Oppenheimer et al., 1993a; Flynn et al. 1994].

Il tasso d'effusione (appendice D) è un parametro fondamentale per la comprensione dell'eruzione, in quanto controlla la dinamica del flusso lavico e le sue modalità di messa in posto. Il tasso d'effusione si calcola a partire dal flusso termico totale (Q_{tot}), derivato da dati telerilevati sia ad alta risoluzione spaziale, quali dati Hyperion, ASTER, Landsat TM [Pieri et al., 1990; Oppenheimer, 1991; Flynn et al. 1994; Harris et al., 1998; Wright et al., 2001], sia da dati ad alta frequenza temporale, quali AVHRR, AATSR e SEVIRI/MSG [Harris et al., 1997a; 1997b; Dehn et al., 2000]. La sinergia di questi dati garantisce contemporaneamente un monitoraggio continuo del processo eruttivo e un'analisi dettagliata della struttura termica della colata lavica [Oppenheimer and Francis, 1997; Harris et al., 1997b; 1998; 1999; 2000].

Il programma *AVHotRR* è stato sviluppato in linguaggio IDL (Interactive Data Language) e consiste in un pacchetto di routine che permettono l'elaborazione *near real-time* delle immagini AVHRR acquisite dalla stazione Terascan INGV-CNT di Roma. *AVHotRR* consente l'identificazione automatica delle anomalie termiche in zone vulcaniche e, in caso d'evento eruttivo, la stima del flusso termico e il tasso d'effusione della colata lavica. Il programma inoltre invia automaticamente messaggi di posta elettronica per avvisare gli utenti finali (funzionari della protezione civile, ricercatori, ecc.) della presenza di un eventuale evento eruttivo in corso.

1. La stazione di acquisizione TERASCAN

La UF Telerilevamento del INGV-CNT ha acquisito nel 2004 il sistema TERASCAN L-Band HPRT per l'acquisizione dei dati AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer). Le prime immagini sono state acquisite a partire dal Luglio 2004 (Fig.1).

Il sistema TERASCAN riceve i dati del sensore AVHRR a bordo della costellazione ad orbita polare NOAA (National Oceanic Atmospheric Administration) con un minimo di 4 immagini al giorno utili al monitoraggio vulcanico. Ogni passaggio è mediamente nelle seguenti fasce orarie:

00:00 -06:00 GMT, 06:00-12:00 GMT, 12:00-20:00 GMT e 20:00-00:00 GMT.

Questa frequenza d'acquisizione rende ideale la stazione TERASCAN al monitoraggio dei vulcani attivi, specialmente nei periodi di crisi eruttiva.

1.1 Il sensore AVHRR

Il sensore AVHRR è uno spettroradiometro ad immagine in grado di misurare la radiazione elettromagnetica emessa o riflessa dalla superficie terrestre in cinque bande con lunghezza d'onda nel visibile (VIS)-vicino infrarosso (NIR), infrarosso medio (MIR) fino al infrarosso termico (TIR). Le bande 1 e 2 sono direttamente convertite dal sistema *Terascan* in albedo e vengono acquisite solo per le immagine diurne (Fig.1). Le tre bande nell'infrarosso (IR) sono invece espresse in temperatura di brillantezza. Di seguito

sono riportate le caratteristiche tecniche principali della stazione satellitare NOAA/AVHRR (immagine cortesemente fornita dalla Dr. Claudia Spinetti, UR Telerilevamento, CNT-INGV).

Stazione satellitare NOAA TeraScan INGV

- Antenna swath area 2000 km * 2000 km

- 4 - 10 passaggi al giorno dei 6 satelliti
NOAA 12-14-15-16-17-18

- Dato AVHRR

- 5 Canali spettrali
- Reflettanza app., Temperatura di brillantezza e Radianza spettrale
- 1.1 km di risoluzione spaziale al Nadir



- Detection diurna e notturna

- 'Ash cloud' utilizzo di T_4 e T_5
- Hotspot pixels utilizzo di T_3 e T_4

AVHRR	NOAA 12, 14, 15, 18	NOAA 17
Canale-1 (VIS)	0.58-0.68 μm	
Canale-2 (NIR)	0.725-1.1 μm	
Canale-3 (MIR)	3.55-3.9 μm	1.58-1.64 μm
Canale-4 (TIR)	10.3-11.3 μm	
Canale-5 (TIR)	11.4-12.4 μm	

Collaborazione AVO Alaska University

Per una descrizione dettagliata del sistema TERASCAN si rimanda al Rapporto Tecnico INGV n°58 [Silvestri et al., 2008].

Le caratteristiche spettrali e radiometriche del sensore AVHRR ci permettono di ottenere informazioni utili per l'analisi di diversi fenomeni vulcanici:

- Riconoscimento di nubi vulcaniche
- Identificazione d'anomalie termiche
- Calcolo del flusso termico e del tasso d'effusione di colate laviche

Al fine di ottenere tali informazioni in *near real time*, è stato sviluppato un sistema automatico d'acquisizione, trasferimento e archiviazione dei dati AVHRR.

1.2 Acquisizione e processamento dei dati AVHRR

La stazione TERASCAN acquisisce in tempo reale i dati AVHRR provenienti dal satellite NOAA attraverso un'antenna installata sul tetto della sede INGV di Roma. Successivamente i dati vengono processati e trasferiti ad altre macchine adibite al monitoraggio dei vulcani attivi italiani. Di seguito è sommariamente descritta la catena di processamento dei dati AVHRR e il loro trasferimento dalla stazione d'acquisizione TERASCAN alla macchina remota che processa i dati.

- Acquisizione dei dati AVHRR in formato TeraScan Data Format (TDF) e processo di conversione dei medesimi in formato Hierarchical Data Format (HDF).
- Procedura FTP di distribuzione dei dati AVHRR in formato HDF dalla stazione TERASCAN verso la macchina Windows che processa i dati. Le immagini sono copiate in una directory della Root denominata 'Newimage'.
- Processo di monitoraggio dei dati AVHRR in ingresso sulla macchina remota.

- Processamento dei dati con AVHotRR.

Per una descrizione dettagliata delle procedure di acquisizione, trasferimento e archiviazione dei dati AVHRR, si rimanda ancora al Rapporto Tecnico INGV n°58 [Silvestri et al., 2008].

Una volta che le immagini sono state trasferite sulla macchina remota, è necessario avviare il programma *AVHotRR* per il processamento dei dati AVHRR.

1.3 Procedura di monitoraggio dei dati AVHRR in ingresso

Il monitoraggio dei dati in ingresso avviene attraverso una procedura scritta in Visual Basic Script (VBS), la cui funzione principale è di eseguire *AVHotRR* ogni volta che una nuova immagine viene trasferita nella directory locale 'Newimage'. Di seguito si riporta un estratto della procedura *avhrr_monitor.vbs*:

```
Set colMonitoredEvents = objWMIService.ExecNotificationQuery _
  ("SELECT * FROM __InstanceCreationEvent WITHIN 10 WHERE " _
  & "TargetInstance ISA 'CIM_DirectoryContainsFile' and " _
  & "TargetInstance.GroupComponent=" _
  & "'Win32_Directory.Name='\"c:\\\\newimage\"'"")

Do
  Set objLatestEvent = colMonitoredEvents.NextEvent
  Set objWMIService = GetObject("winmgmts:" _
  & "{impersonationLevel=impersonate}!\" & strComputer & "\root\cimv2")
  Set objStartup = objWMIService.Get("Win32_ProcessStartup")
  Set objConfig = objStartup.SpawnInstance _
  objConfig.PriorityClass = 32768
  Set objProcess = GetObject("winmgmts:root/cimv2:Win32_Process")
  strComputer = "."
  Set objWMIService = GetObject("winmgmts:" _
  & "{impersonationLevel=impersonate}!\" & strComputer & "\root\cimv2")
  Set colProcesses = objWMIService.ExecQuery _
  ("Select * from Win32_Process Where Name = 'idlde.exe'")

  If colProcesses.Count = 0 Then
    objProcess.Create "c:\PROGRAMMI\RSI\IDL62\bin\bin.x86\idlde.exe
    @C:\avhotr\startup.go", Null, objConfig, intProcessID
  End If
Loop
```

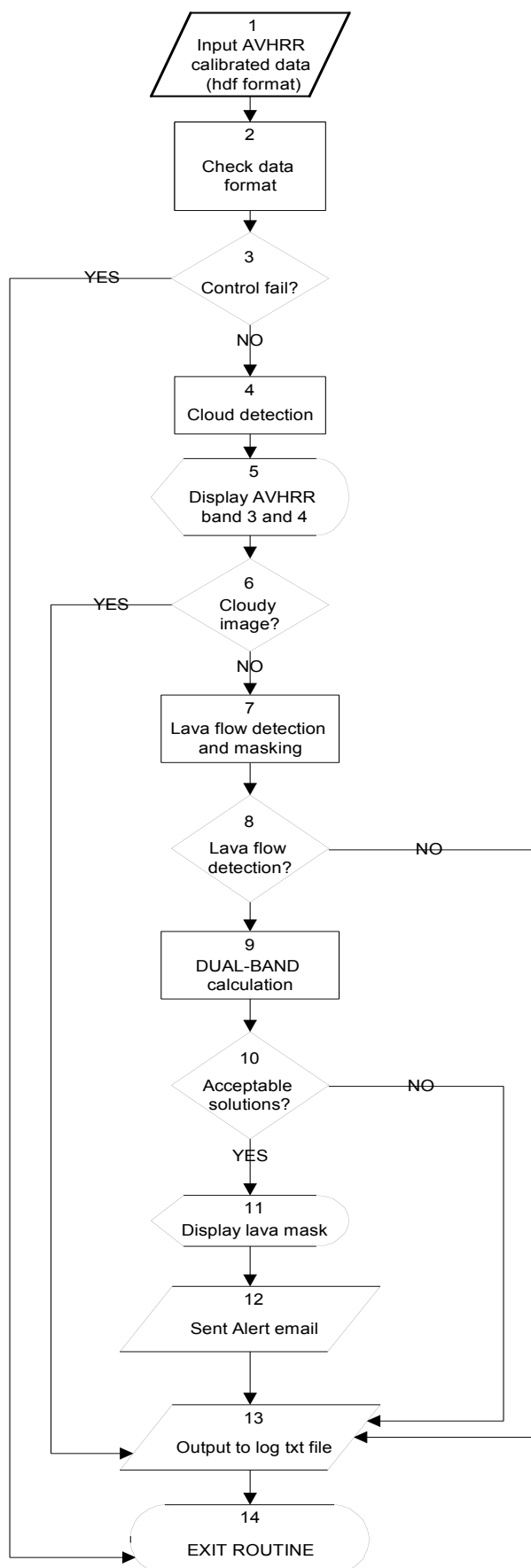
Lo script esegue costantemente (*Loop*) un controllo sulla directory 'C:\Newimage\' e qualora si riscontrino delle variazioni nel numero dei file contenuti, lancia il compilatore IDL (*idlde.exe*) che esegue il file *batch startup.go*. Il file *startup.go* contiene a sua volta le istruzioni per compilare ed eseguire la routine IDL *AVHotRR* (*avhotr.pro*). Prima di eseguire *idlde.exe* il programma verifica che non ci siano altre sessioni aperte d'IDL, al fine di evitare possibili conflitti con le altre procedure in uso.

2. Il programma AVHotRR

AVHotRR è un nuovo software per il monitoraggio *near real-time* dei vulcani attivi italiani (Etna, Stromboli) attraverso l'analisi delle immagini AVHRR. Il programma è stato realizzato in linguaggio IDL 6.2 ed utilizza le potenzialità grafiche di ENVI (ENvironment for Visualizing Images) per la visualizzazione e il processamento dei dati AVHRR.

2.1 Descrizione generale

AVHotRR consente di identificare automaticamente le anomalie termiche in zone vulcaniche e di calcolare in caso d'eruzione il flusso termico e il tasso d'effusione delle colate laviche.



In figura 1 è rappresentato la *flow-chart* del programma con la descrizione dei vari blocchi. Segue una descrizione dettagliata delle principali funzioni implementate:

1) Ingestione dei dati AVHRR in formato hdf. I dati sono calibrati in albedo per le bande del visibile (1 e 2) e in temperatura di brillantezza per le bande IR (3-5).

2) controllo sul formato dei dati. Viene principalmente analizzata la struttura dei dati hdf e determinato se le immagini AVHRR sono diurne o notturne (quindi senza bande nel visibile). Talvolta si verificano errori nell'acquisizione dell'immagine e bisogna rigettare i dati.

3) se l'immagine è corrotta il programma interrompe il processo d'elaborazione.

4) altrimenti inizia il processo d'identificazione dei pixel nuvolosi. Viene creata una maschera di pixel nuvolosi utilizzando due distinti algoritmi per le immagini diurne e notturne.

5) le bande 3 e 4 sono visualizzate in una finestra grafica con la relativa copertura nuvolosa.

6) se l'immagine è nuvolosa si riporta l'informazione sul file di log e il programma termina.

7) altrimenti si passa all'analisi per la ricerca di eventuali anomalie termiche nell'immagine. Viene utilizzato l'algoritmo implementato da Lombardo et al. (2004) per individuare i pixel radianti associati ad attività effusiva.

8) i pixel che soddisfano il sistema dual-band individuano una maschera sulla quale vengono successivamente eseguiti i calcoli per la stima del tasso di effusione. Se non ci sono pixel che soddisfano tale i requisiti, il programma scrive sul file di log e termina.

9) inizia il calcolo *dual-band* sui pixel radianti. Viene calcolata la temperatura integrata della lava e la frazione di colata all'interno del pixel (analisi sub-pixel). Questi parametri permettono la stima del flusso termico e del tasso d'effusione.

10) verifica sulla qualità dei risultati. Le soluzioni del sistema *dual-band* vengono controllate per accertare che i valori siano fisicamente accettabili. Se i risultati sono rigettati il programma termina e sul file di log è riportato il codice di errore.

11) altrimenti AVHotRR visualizza la maschera di pixel radianti.

Viene creata una immagine RGB che sintetizza le informazioni sulla localizzazione dell'anomalia termica, gli eventuali pixel saturati, e i pixel con contaminazione nuvolosa.

Figura 1 *flow-chart* del programma *AVHotRR*.

- 12) tutte le informazioni (inclusa l'immagine RGB convertita in formato JPEG (Joint Photographic Experts Group), sono inviate per posta elettronica ad una mail-list di utenti.
 13) i valori di temperatura della colata, di flusso termico e di tasso d'effusione sono trascritti sul file di log
 14) tutti i file in scrittura e lettura sono chiusi e la sessione IDL termina.

Di seguito sono riassunte le principali funzioni implementate nel programma:

- Individuazione delle anomalie termiche: sistema di *early-alert*
- Analisi *sub-pixel* per la stima della superficie lavica.
- Calcolo del flusso termico e del tasso d'effusione.
- Invio delle informazioni tramite posta elettronica.

2.2 Individuazione delle anomalie termiche

Il sistema d'*early-alert* permette di analizzare le immagini in temperatura elaborate dalla stazione Terascan al fine di identificare eventuali anomalie termiche. Tuttavia, prima di procedere all'identificazione delle anomalie è necessario accertarsi che non ci sia contaminazione nuvolosa da parte dei pixel radianti. La contaminazione nuvolosa può influenzare l'individuazione di potenziali anomalie termiche essenzialmente in due modi: nubi spesse che oscurano completamente l'anomalia sottostante (e.g. cumuli e stratocumuli); nubi semitrasparenti che permettono l'individuazione della colata ma attenuano il valore di radianza misurato al sensore (e.g. cirri o *plumes* vulcanici). In quest'ultimo caso, le stime del tasso d'effusione devono considerarsi inesatte e quindi da rigettare.

2.2.1 Creazione maschera per le nubi

I pixel interessati da contaminazione nuvolosa sono individuati attraverso l'impiego di due algoritmi distinti per le immagini diurne e notturne. Le immagini diurne sono influenzate dal contributo solare in riflettanza. Per questo motivo si usa nell'algoritmo la banda 2 (b2) del visibile espressa in albedo. Vengono considerati nuvolosi i pixel i cui valori di albedo e temperatura nelle bande 3 e 4 (b3 e b4) soddisfano una sola delle seguenti condizioni:

$$b4 < 0 \quad (1a)$$

oppure:

$$\begin{cases} b2 > 0.65 & (1b) \\ (b3 - b4) > 15 & (1c) \end{cases}$$

Le immagini notturne non presentano ovviamente bande nel visibile e l'algoritmo di identificazione delle nubi si deve basare esclusivamente sulle informazioni di temperatura contenute nelle bande dell'infrarosso. Sono identificati come nuvolosi i pixel che soddisfano contemporaneamente le seguenti condizioni:

$$\begin{cases} (b3 - b4) < 25 & (2a) \\ b4 < 0 & (2b) \\ (b4 - b5) > 0.2 & (2c) \end{cases}$$

Dove b5 rappresenta il valore di temperatura misurato in banda 5. Tutte le temperature sono espresse in gradi Celsius.

2.2.2 Creazione maschera per la colata lavica

L'identificazione delle anomalie avviene attraverso un filtro digitale elaborato da Lombardo et al. [2004]. Questo filtro è stato implementato basandosi sullo studio teorico del sistema *dual-band* (appendice B), utilizzando le due bande SWIR del sensore Landsat TM. Tale studio ha permesso di comprendere il rapporto tra la radianza nelle due bande $Rad\alpha$ e $Rad\beta$ e i valori f_h e T_h fisicamente accettabili, ottenuti dalla soluzione del sistema *BI*. Questo filtro è stato in seguito adattato alle bande 3 (MIR) e 4 (TIR) dell'AVHRR [Lombardo et al., sottomesso] ed è descritto dalla seguente relazione:

$$\begin{cases} Rad4*(0.001043*T_m - 0.28862) > Rad3 > 0.0657*Rad4 & (3a) \\ Rad3 > 200 & (3b) \\ Rad4 > 3000 & (3c) \end{cases}$$

dove T_m è la temperatura media stimata per la colata lavica e Rad3 e Rad4 sono i valori di radianza in banda 3 e 4 espressi in $mW/m^2/ster/\mu m$. Ovviamente T_m è un valore medio che può variare a seconda della composizione della lava e del tipo di eruzione [Harris et al., 1997b; Behncke and Neri, 2003; Coltelli et al., 2007]. Basandosi su dati di letteratura è stato assunto un valore medio di $500^\circ C$ per T_m che si riferisce ad un ipotetico basalto dell'Etna con temperatura delle fratture di $1080^\circ C$, temperatura della crosta di $250^\circ C$ e frazione della parte occupata da fratture di 0.01.

Le condizioni di soglia espresse dalla 3b e 3c hanno invece lo scopo di selezionare soltanto i cosiddetti pixel "caldi", cioè quei pixel che oltre a soddisfare la 3a hanno anche valori di radianza sufficientemente elevati da essere compatibili con la presenza di lava. Queste ultime condizioni permettono inoltre di escludere dalla maschera pixel caldi associati ad altre fenomenologie (e.g. *sun-glint* della superficie marina o surriscaldamento terrestre per insolazione). L'algoritmo è stato testato per garantire il minor numero di falsi allarmi utilizzando per la sua validazione la serie storica d'immagini AVHRR acquisite durante l'eruzione dell'Etna 2006 (giugno-dicembre).

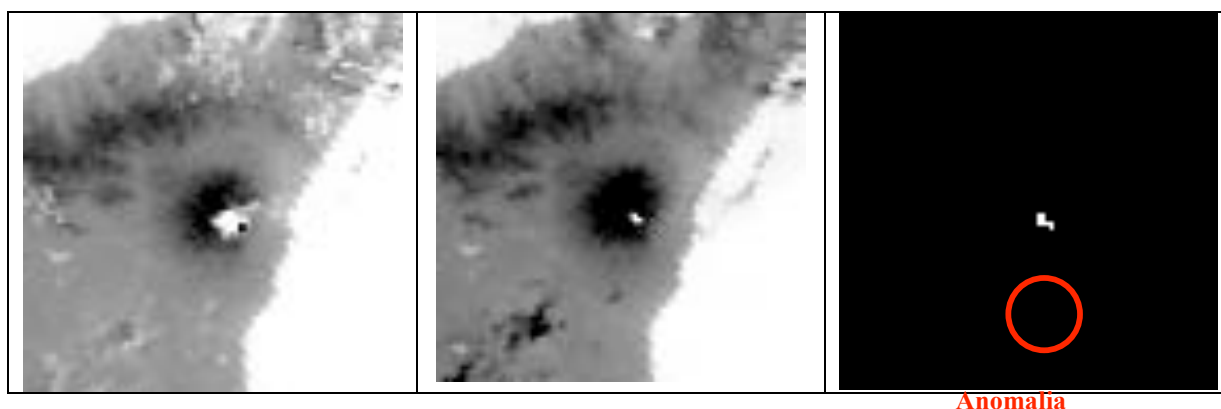


Figura 2 Immagine dell'eruzione dell'Etna ripresa dall' AVHRR durante l'attività 2006 nella banda MIR 3 (a) e nella banda TIR 4 (b) e relativa maschera dell'anomalia termica generata da AVHotRR (c).

Sui pixel radianti individuati dalla 3 (*lavamask*) viene eseguito un successivo controllo per accertarsi che essi non siano saturati in una delle due bande [Harris et al., 1997b]. La saturazione dei canali 3 e 4 avviene rispettivamente per temperature di 50 e $52^\circ C$. Alla maschera delle colate viene quindi regolarmente associata una maschera di saturazione per le due bande distinte (*saturmask3* e *4*). Dalle osservazioni di Harris et al. [1997], suffragata dall'indagine statistica operata sulla nostra serie storica (circa 1000 immagini), risulta che la saturazione dei canali AVHRR in presenza di colate di lava avviene prevalentemente in banda 3. Lombardo et al. (2004) hanno dimostrato che in caso di saturazione in una sola delle due bande si ottengono valori di flusso termico, e quindi di tasso d'effusione, sottostimati. Risulta quindi fondamentale conoscere quanti pixel radianti della colata sono saturati e quindi avere una valutazione qualitativa sulla sottostima del tasso d'effusione.

2.2.3 Confronto tra la maschera delle nubi e la maschera della colata

Il confronto tra la maschera delle nubi (*cloudmask*) e la *lavamask* permette di determinare se i pixel radianti della colata sono soggetti a contaminazione nuvolosa. Per illustrare sinteticamente le informazioni della colata e della nuvolosità, il programma genera una immagine RGB (*RGBimage*) nella quale i tre canali corrispondono rispettivamente alla *lavamask* (R), *saturmask3* (G) e *cloudmask* (B). *RGBimage* consente all'operatore di valutare immediatamente la qualità dei dati e stabilire quindi l'affidabilità dei risultati. Di seguito è riportata una legenda che riassume il significato delle possibili combinazioni di colori RGB:

Rosso (R) = pixel dove il sistema 3 è risolvibile.

Verde (G) = pixel saturati in banda 3.

Blu (B) = pixel con contaminazione nuvolosa.

Giallo (RG) = pixel dove il sistema è risolvibile ma saturati in banda 3

Viola (RB) = pixel dove il sistema è risolvibile ma nuvolosi.

Bianco (RGB) = pixel dove il sistema è risolvibile ma saturati e nuvolosi.

La figura 3 mostra tre immagini RGB elaborate durante l'eruzione Etna 2006. Nella prima immagine(3a) sono praticamente assenti nubi mentre nelle immagini 3b e 3c si osserva la presenza di una copertura nuvolosa sempre più estesa che però non interessa la zona della colata. In figura 3c si possono notare un certo numero di pixel gialli che indica saturazione di radianza in banda 3. Sebbene non sia possibile quantificare gli effetti della saturazione, possiamo in ogni modo affermare che il nostro tasso d'effusione sarà sicuramente sottostimato rispetto a quello reale.

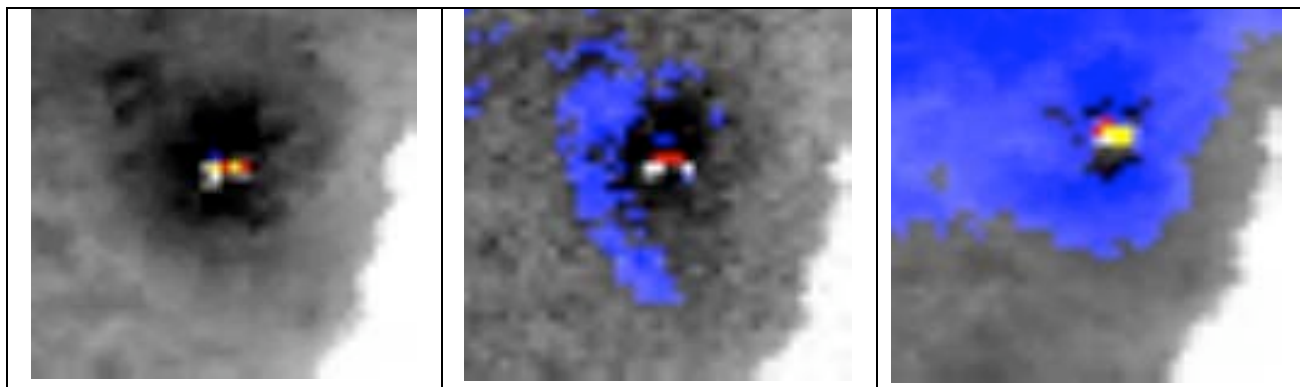


Figura 3 Immagini RGB dell'eruzione dell'Etna 2006 ripresa dall'AVHRR nelle date 08/11/2006 (a), 07/11/2006 (b) e 06/11/2006 (c). Ogni immagine ha una dimensione di 40x40 pixel che corrisponde a circa 1940 km² di superficie. Le immagini sono ingrandite di un fattore 4.

È interessante notare la presenza di pixel “accesi” ma non saturati di colore bianco (Fig. 3° e 3b) attorno alla maschera della colata (rossa o gialla). Questi pixel, che a prima vista potrebbero sembrare “caldi”, sono in realtà causati da fenomeni di *blurring* dovuti alle emissioni gassose del vulcano e sono rigettati dal filtro descritto dalla 3.

La figura 4 illustra invece alcuni casi di contaminazione nuvolosa dei pixel radianti. L'immagine 4a mostra poche nubi concentrate sulla sommità dei crateri, con gran parte dei pixel della colata saturati (bianchi) e uno solo non saturato (viola). Le immagini 4b e 4c, nonostante la spessa copertura nuvolosa, rilevano chiaramente un'anomalia nella parte sommitale del vulcano. Tuttavia, i prodotti di flusso termico e tasso d'effusione dovranno necessariamente essere rigettati.

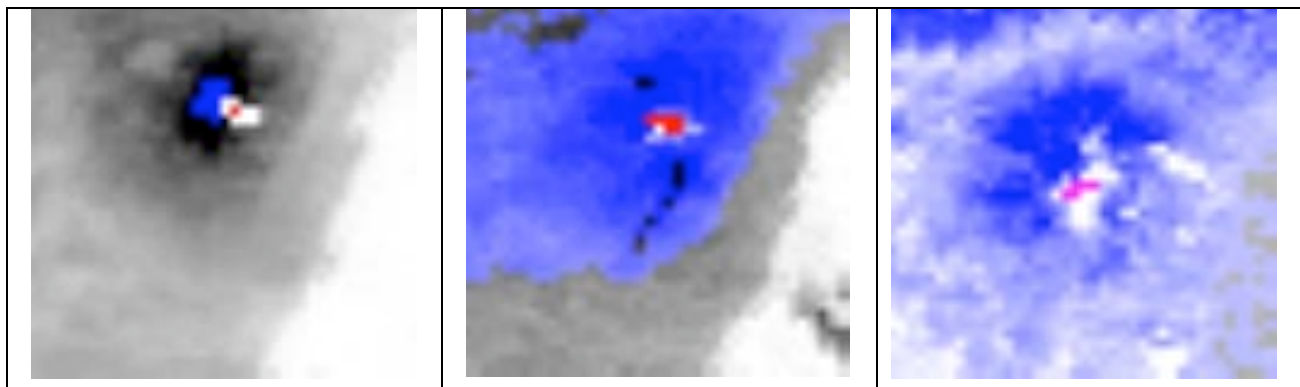


Figura 4 Esempi di contaminazione nuvolosa: immagini RGB dell'eruzione dell'Etna 2006 ripresa dall'AVHRR nelle date 24/11/2006 (a), 05/11/2006 *daytime* (b) e 05/11/2006 *nighttime* (c).

A questi contenuti si aggiunge anche l'informazione inerente alla posizione dell'anomalia. Molte presunte anomalie sono facilmente riconducibili a falsi allarmi semplicemente osservando la loro posizione rispetto all'edificio vulcanico (Fig.5a). Nella figura 5a l'anomalia in alto a sinistra è chiaramente troppo distante dall'Etna per essere considerata d'origine vulcanica. La vera colata lavica è invece completamente oscurata dalla fitta coltre di nubi nella parte centrale dell'immagine.

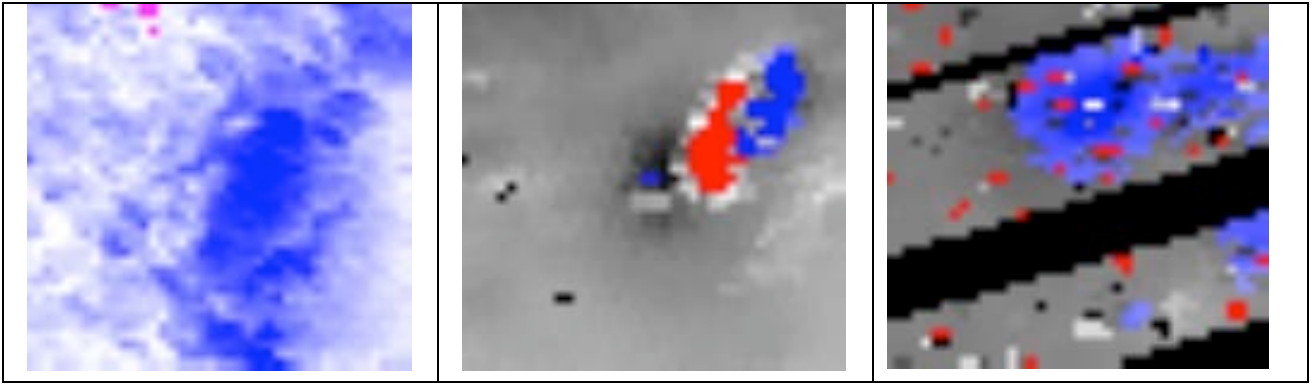


Figura 5 Esempi di falsi allarmi: immagini RGB dell'eruzione dell'Etna 2006 ripresa dall'AVHRR nelle date 16/10/2006 (a), 26/11/2006 (b) e 05/11/2006 (c).

Anche il caldo *plume* vulcanico, in determinate condizioni di temperatura e spessore, può essere identificato come anomalia termica dal programma (Fig. 5b). In questi casi tuttavia l'estensione areale dell'anomalia risulta solitamente molto superiore a quella di una vera colata lavica (confrontare la figura 5b con le immagini di colate in figura 3).

Infine, analizzando *RGBimage* si può facilmente riconoscere un'immagine rumorosa come quella in figura 5c.

AVHotRR esegue un'ulteriore analisi sui pixel di *lavamask*, per determinare la dimensione della superficie areale dell'anomalia e il numero di anomalie distinte presenti all'interno dell'immagine.

Poiché una colata di lava dell'Etna difficilmente può superare una superficie di 3-5 km², il programma rigetta automaticamente le anomalie di dimensione superiore ai 20 pixel. Nel caso di figura 5b, l'anomalia dovuta al *plume* vulcanico viene riconosciuta come falso allarme e rigettata.

Analogamente, la possibilità che si abbiano due o più anomalie realmente associate a diverse colate laviche risulta altamente improbabile. Si può osservare ad esempio (Fig.6) che le immagini AVHRR acquisite durante l'eruzione dell'Etna 2001 mostravano la presenza di una sola vasta anomalia, là dove erano attive sette distinte bocche eruttive [Behncke and Neri, 2003]. Per questa ragione *AVHotRR* è stato programmato a rigettare automaticamente tutti quelle immagini che presentano più di due anomalie nella *lavamask*. Questa condizione ci permette di riconoscere i falsi allarmi come quello illustrata in figura 5c.

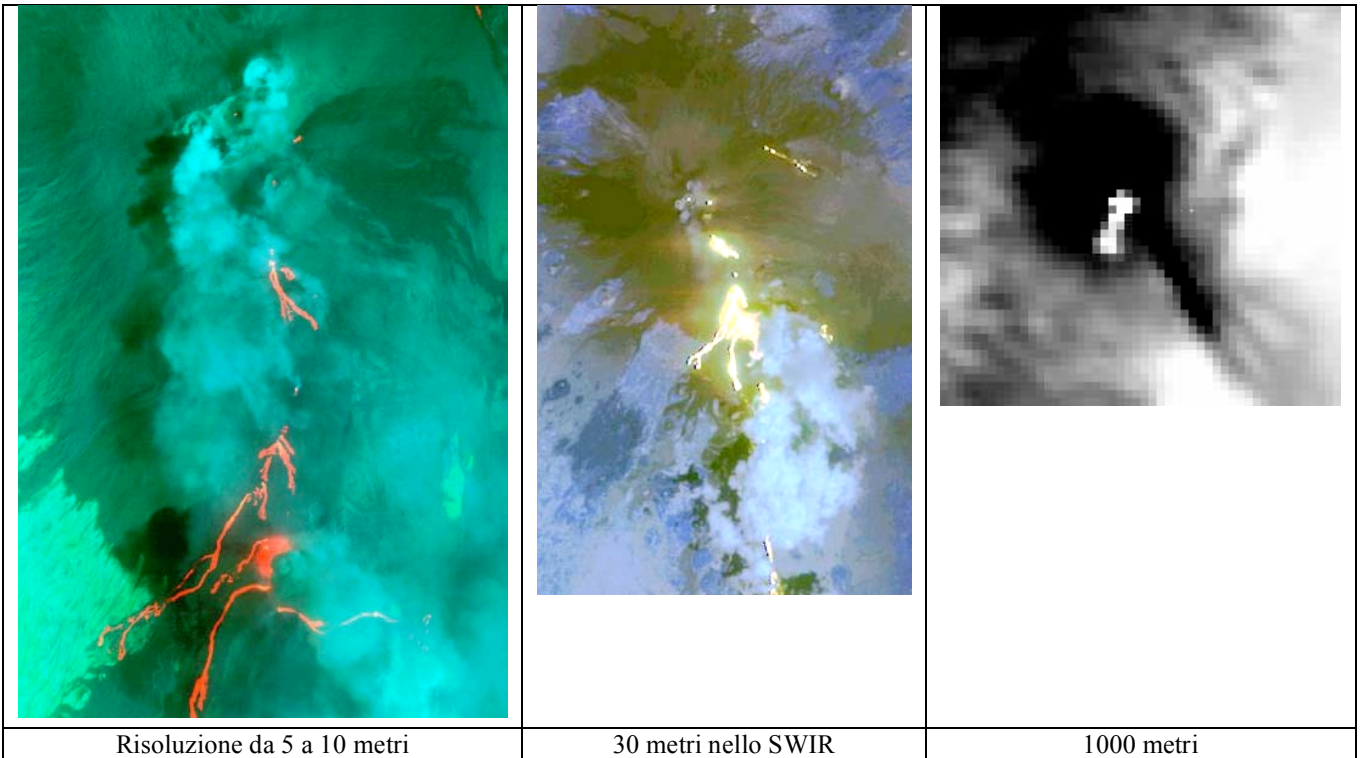


Figura 6 Eruzione dell'Etna 2001 ripresa il 29 luglio dai sensori MIVIS (a), ASTER (b) e AVHRR (c). Nell'immagine AVHRR non è chiaramente possibile distinguere nessuna delle 7 diverse bocche eruttive

2.3 Analisi sub-pixel: stima della temperatura e della superficie lavica

Una volta identificata l'anomalia si attiva la procedura per il calcolo dell'estensione della superficie della colata e della sua temperatura integrata (analisi *sub-pixel*). Per un approfondimento sull'analisi sub-pixel e il calcolo di questi parametri si rimanda all'appendice B (tecnica *dual-band*). Poiché il sistema d'equazioni *dual-band* adattato ai dati AVHRR (B2) consta di due equazioni e tre incognite, dobbiamo necessariamente definire la temperatura di background per risolvere il sistema. La temperatura di background può essere direttamente stimata utilizzando gli stessi dati telerilevati.

2.3.1 Stima della temperatura di background

AVHotRR è in grado di valutare la temperatura di background dall'analisi dei pixel "freddi" adiacenti l'anomalia termica. Nel caso dell'Etna, infatti, esiste una zona intorno ai crateri sommatiali caratterizzata prevalentemente dall'accumulo di colate laviche, che formano un'estesa coltre di basalto dalla sommità del vulcano fino a circa quota 1300 s.l.m. (Fig. 7a). Poiché l'emissività dei basalti è nota [Buongiorno et al., 2002], è possibile stimare la temperatura di background direttamente utilizzando l'equazione di Planck (vedi appendice A).

In caso d'evento eruttivo (e.g. Fig. 7b), *AVHotRR* esegue automaticamente un *contour* dell'anomalia termica (Fig. 7c) ed individua una maschera di pixel intorno a *lavamask*. Su questi pixel il programma calcola i valori di temperatura di background minimo e massimo che verranno poi utilizzati nel sistema di calcolo *dual-band*.

Questo metodo di stima della temperatura di background ha l'indiscutibile vantaggio di non richiedere dati ausiliari.



Figura 7 Zona sommatiale dell'Etna (pixel neri) caratterizzata da un'omogenea distesa di colate laviche (a); anomalia termica visibile nell'immagine AVHRR del 30/10/2006 (b) e relativo *contour* generato per la stima della temperatura di background (c).

Tuttavia, la presenza di disturbi o di contaminazione nuvolosa nelle immediate adiacenze dell'anomalia termica, può portare ad un'errata valutazione della temperatura di background. Nel caso di presenza di disturbi, *RGBimage* rappresenta ancora una volta l'unico strumento per verificare la qualità del prodotto.

2.3.2 Influenza della temperatura di background sulle soluzioni del sistema

Una volta determinato il valore minimo (T_{bmin}) e massimo (T_{bmax}) della temperatura di background, *AVHotRR* inizia la procedura per la soluzione del sistema *dual-band*. Le soluzioni del sistema (T_{lava} e f_{lava}) sono calcolate per tutti i valori di T_b nell'intervallo $T_{bmin} - T_{bmax}$, con risoluzione di $1^\circ C$.

In figura 8 sono rappresentati gli andamenti di T_{lava} e f_{lava} in funzione di T_b , calcolati per un pixel radiante della colata lavica attiva il 30/10/2006. La temperatura di background varia nell'intorno della colata in un intervallo di $0-10^\circ C$.

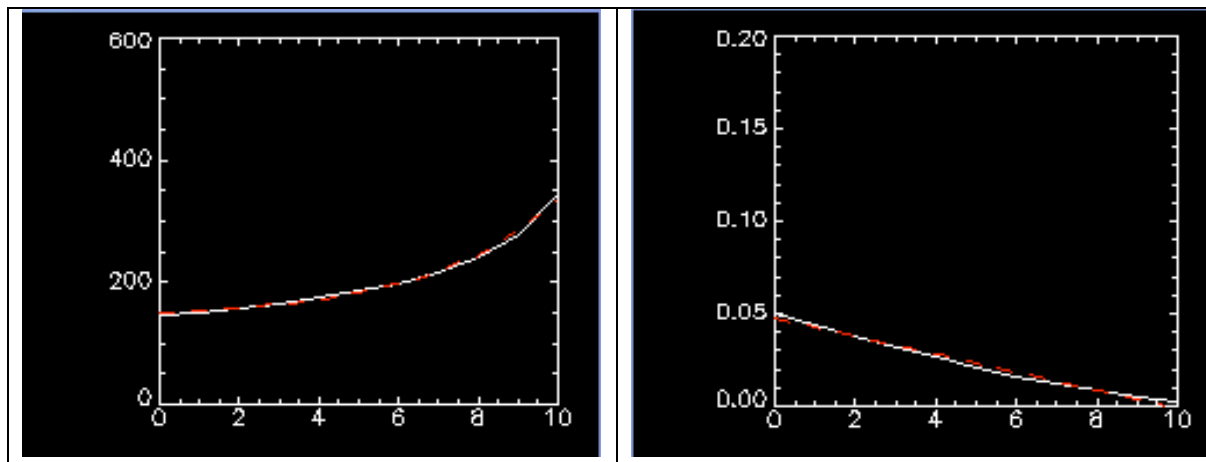


Figura 8 Andamento della temperatura integrata della lava T_{lava} (a) e della frazione di pixel occupata dalla lava f_{lava} (b) in funzione della temperatura di background T_b , per un pixel radiante della colata attiva il 30/10/2006. Le curve bianche sono le soluzioni del sistema *dual-band* mentre le curve in rosso rappresentano rispettivamente l'interpolazione logaritmica e lineare.

Il dato rilevante che emerge da questi grafici è sicuramente la regolarità degli andamenti T_{lava} vs T_b e f_{lava} vs T_b . In particolare si può notare che T_{lava} segue un andamento logaritmico mentre f_{lava} ha un andamento pressoché lineare. Queste osservazioni sono in accordo con l'analisi delle soluzioni teoriche del sistema *dual-band* pubblicate da Glaze et al. [1989], Oppenheimer [1993b] e Lombardo et al. [2004; 2006a; 2006b].

Gli andamenti di T_{lava} e di f_{lava} possono essere rispettivamente interpolati con una funzione logaritmica e lineare (Fig.7). La deviazione standard sulle soluzioni T_{lava} (σ_T) è generalmente minore di 1°C , mentre quella sui valori f_{lava} (σ_f) è minore di 10^{-3} . Si è osservato che valori maggiori di σ_T e σ_f si ottengono soltanto nel caso di pixel "rumorosi", ricampionati (appendice E), o soggetti a fenomeni di *blurring* dovuto a presenza di *plume* vulcanici.

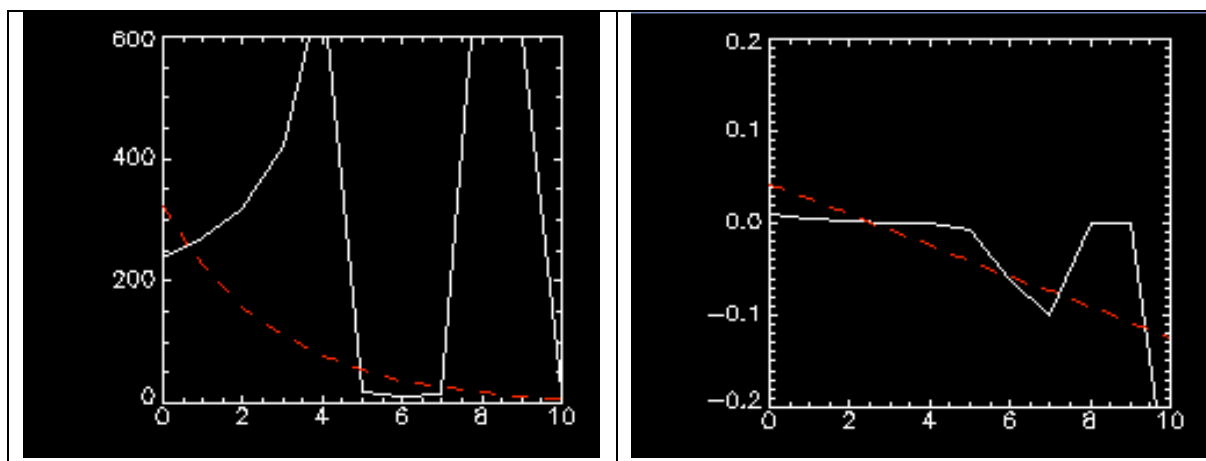


Figura 9 Andamento di T_{lava} (a) e di lava f_{lava} (b) in funzione di T_b , per un pixel ricampionato della colata lavica attiva il 30/10/2006. In rosso le rispettive interpolazioni logaritmiche e lineari.

La deviazione standard delle soluzioni *dual-band* si presta quindi ad essere utilizzata come un ulteriore strumento d'analisi dei pixel radianti della colata. In figura 9 è riportato l'andamento di T_{lava} e f_{lava} per un pixel ricampionato dell'immagine AVHRR acquisita nel giorno 30/10/2006. In questo caso, sono stati ottenuti valori di σ_T e σ_f rispettivamente di 19°C e $4 \cdot 10^{-2}$. Risulta quindi agevole rigettare tali pixel sulla base dell'osservazione dei valori di deviazione standard.

2.4 Calcolo del flusso termico e del tasso d'effusione

Una volta determinati T_{lava} e f_{lava} per un intervallo di valori di T_b , (Fig.10) si procede al calcolo del flusso termico (Q_{lava}) della colata e del tasso d'effusione (E_r). Gli algoritmi per la stima di Q_{lava} ed E_r sono stati derivati dalle equazioni C2 e D1 in appendice. Q_{lava} e E_r devono essere calcolati per ogni pixel dell'anomalia termica (esclusi ovviamente quelli rigettati). La sommatoria sul numero dei pixel ci fornisce la stima del flusso termico totale (Q_{tot}) e del tasso d'effusione totale (E_{tot}). Poiché Q_{tot} e E_{tot} sono funzione di T_{lava} e f_{lava} (appendice C e D) le nostre stime varieranno in un intervallo di valori dipendente da T_b .

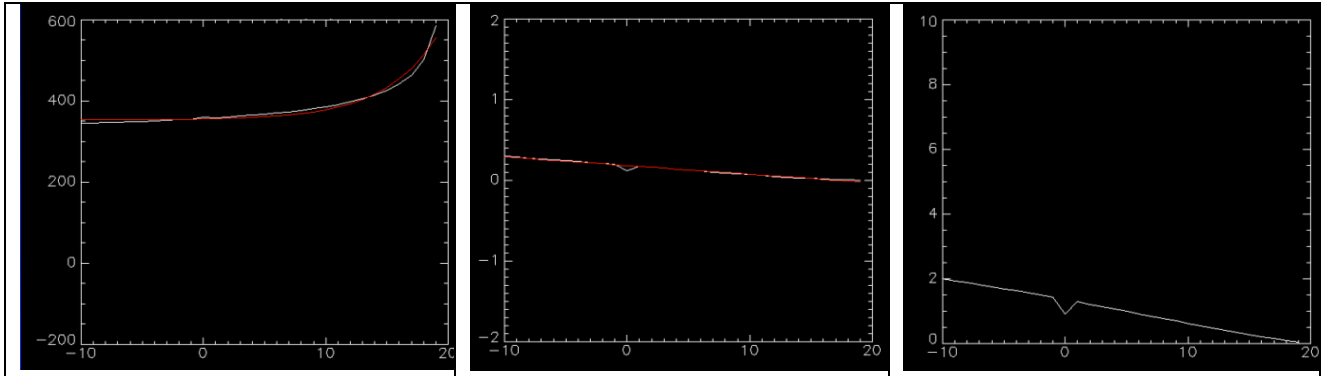


Figura 10 Andamento di T_{lava} (a), f_{lava} (b) e relativo E_r (c) in funzione di T_b .

In figura 10c si vede l'andamento di E_r in funzione di T_{lava} e f_{lava} calcolati per un singolo pixel nell'intervallo $T_{bmin} - T_{bmax}$. Si può notare come l'andamento del tasso d'effusione decresca all'aumentare della temperatura di background. Nell'intervallo T_b considerato (-10-20°C), E_r varia da circa 0.2 m³/s fino a circa 2.0 m³/s. Questa notevole variazione nella stima di E_r è ovviamente intrinseca al metodo di calcolo, e può essere minimizzata solo migliorando la stima di T_b . Accurati valori della temperatura di background possono essere conseguiti attraverso misure di campagna. Tuttavia, trattandosi di misure locali, hanno spesso il difetto di non essere rappresentative dell'intera superficie ripresa dal pixel AVHRR (dimensione di ~1 km²).

2.5 Invio delle informazioni tramite posta elettronica

Alla fine del calcolo del tasso d'effusione, **AVHotRR** attivata automaticamente una procedura per l'invio delle informazioni agli organi competenti (messaggio di *alert*). Le informazioni sono spedite attraverso posta elettronica ad una *mail-list* di utenti utilizzando un programma di gestione del server di posta chiamato *Blat32*.

2.5.1 Descrizione del programma *Blat32*

Blat32 è un programma *freeware* (www.blat.net) per ambiente Windows che permette di gestire le operazioni di posta elettronica attraverso un sistema a linea di comando. *Blat32* è uno strumento assai evoluto che consente di inviare non solo e-mail singole, ma anche e-mail multiple (*newsletter*), può personalizzare il contenuto di ogni e-mail e può allegare ai messaggi file codificati in più formati.

Prima di cominciare a spedire e-mail con *Blat32* è necessario configurare un Server SMTP e il nome del mittente. Di seguito è riportato schematicamente la procedura per l'invio dei messaggi di *alert*:

- AVHotRR genera un file di ASCII (*alert.txt*) con le informazioni derivate dall'analisi dell'immagine AVHRR e dal calcolo del sistema *dual-band*.
- AVHotRR lancia il file *batch* nominato *alertmail.bat* contenente la sequenza di comandi per eseguire *Blat32*.
- *Blat32* spedisce il file *alert.txt* con allegata l'immagine *RGBimage.jpg* alla mail-list di utenti specificati nel file ASCII *maillist.txt*.

La stringa di comando contenuta nel file *alertmail.bat* è di seguito riportata:

```
blat.exe alert.txt -subject "Etna Alert" -tf maillist.txt -attach RGBimage.jpg -p
```

2.5.2 Struttura del file di *alert*

Ci sono tre classi di informazioni che vengono comunicate nel messaggio di *alert*:

- Informazioni sulla qualità dell'immagine
- Valori della temperatura e del tasso d'effusione.
- Attendibilità delle procedure di calcolo.

La qualità dell'immagine dipende da vari fattori e come già illustrato nel paragrafo 2.2, lo strumento ideale per la sua valutazione è l'analisi di *RGBimage*. Per questo motivo, *RGBimage* è convertita in formato JPEG ed inviata come allegato nel messaggio d'*alert*. Tutte le immagini JPG generate sono salvate su un'apposita directory che permette ad un operatore di consultare la serie storica in qualsiasi momento.

Nel file di testo *alert.txt* sono riportati i valori di tasso di effusione minimo, medio e massimo calcolati in funzione della temperatura di background massima, media e minima, come spiegato nel paragrafo 2.4. L'analisi della temperatura di background può fornire interessanti informazioni sulla procedura di calcolo. Temperature fisicamente inaccettabili per l'Etna (T_b oscilla annualmente tra i -20°C e i 40°C), sono automaticamente rigettate dal programma. Tuttavia l'operatore, con un po' di pratica e di buon senso, può anche utilizzare i valori di T_b per riconoscere risultati palesemente errati. Per esempio, un valore di T_b superiore a 20°C , prodotto da un'immagine notturna nel periodo invernale, dovrebbe indurre l'operatore a diffidare dei risultati ottenuti.

Nel file d'*alert* è infine riportato il risultato della procedura di calcolo del tasso d'effusione. Di seguito è illustrata la lista dei codici d'errore che il programma genera alla fine della procedura:

Effusion >>>>.....Calcolo *effusion rate* corretto.
Eff.multi>>>>.....Sono stati rilevati più hot-spot distinti.
Effus. Error.....Uno o più risultati sono errati (NaN).
All rejected.....Tutti i pixel dell'anomalia sono stati rigettati.

- Il messaggio "Effusion >>>>" viene generato quando la procedura di calcolo del tasso d'effusione si è conclusa senza errore per almeno un pixel dell'anomalia termica (Fig.11).
- "Eff.multi>>>>" indica la presenza di più anomalie termiche nell'immagine AVHRR. Come già descritto nel paragrafo 2.2.3, la presenza di distinte anomalie può essere indicatrice di falsi allarmi.
- Il messaggio "Effus. Error" si genera quando tutti i pixel di *lavamask* sono stati rigettati in fase di calcolo per un determinato valore di T_b . Questo risultato può indicare un errore nella stima della temperatura di background. I valori di tasso d'effusione per i rimanenti valori di T_b potrebbero tuttavia essere corretti.
- Analogamente, il messaggio d'errore "All rejected" viene generato quando tutti i pixel di *lavamask* sono stati rigettati per tutti i valori di T_b . In questo caso si tratta quasi sicuramente di un falso allarme.

Oltre a queste informazioni è ovviamente riportata l'indicazione sulla nuvolosità dei pixel lavici.

Nel file d'*alert* è presente una legenda che illustra lo schema dei colori RGB e il significato dei codici d'errore sopra illustrati.

Probabile evento eruttivo sull Etna.

Data: 04/09/2007
Ora GMT: 20:35
Immagine elaborata: 2007.0904.2035.n17.avhrr.hdf
Periodo acquisizione: Day
Nuvolosità immagine: Clear
Calcolo effusion rate: Effusion >>>

Effusion rate minimo:	5.29276 (m3/sec)	Temp max:	-9 °C
Effusion rate medio:	6.87501 (m3/sec)	Temp med:	4 °C
Effusion rate massimo:	8.84495 (m3/sec)	Temp min:	13 °C

N.B. Se la temperatura ambiente è inaccettabile (e.g. >40°C o <-20°C)
le relative stime di effusion rate vanno rigettate.

LEGENDA

Effusion >>>.....Calcolo effusion corretto.
Eff.multi>>>.....Sono stati rilevati più hot-spot distinti
Possibile presenza di falsi allarmi
Effus. Error.....Uno o più risultati sono errati (NaN)

SCHEMA COLORI IMMAGINE RGB (banda 3)

Rosso (R) = pixel dove il sistema è risolvibile
Verde (G) = pixel saturati in banda 3
Blu (B) = pixel con probabile contaminazione nuvolosa

Giallo = pixel dove il sistema è risolvibile ma saturati in banda 3
(valori effusion rate sottostimati)
Viola = pixel dove il sistema è risolvibile ma nuvolosi
Bianco = pixel dove il sistema è risolvibile ma saturati e nuvolosi

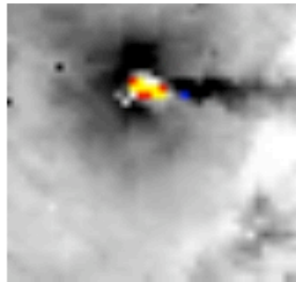


Figura 11 Esempio di messaggio d'Alert spedito tramite posta elettronica.

2.6 File ASCII di Output

Le informazioni inviate per posta elettronica sono parallelamente riportate su un file di *log* in formato ASCII (avhotrr.log). In questo file compaiono sequenzialmente i *log* di tutte le immagini processate, comprese quelle che non presentano alcuna anomalia termica. In questo modo si ha una memoria storica continua e dettagliata della successione d'eventi accaduti sul vulcano monitorato.

Il file di *log* presenta inoltre il vantaggio di poter essere immediatamente utilizzato da programmi d'analisi e visualizzazione (e.g. Microsoft Excel) per realizzare grafici sull'andamento temporale del tasso d'effusione o del flusso termico (vedere per esempio il grafico excel di figura 12).

3. Validazione dei risultati e analisi dell'errore

I risultati generati da *AVHotRR* sono stati validati utilizzando essenzialmente dati di campagna e dati telerilevati provenienti da altri sensori. In particolare, per la validazione dei dati di tasso d'effusione, si sono utilizzate le immagini AVHRR acquisite durante l'eruzione dell'Etna 2006.

3.1 Confronto con dati satellitari e di terra

In figura 12 si vede l'andamento del tasso d'effusione massimo e minimo calcolati dal programma *AVHotRR* nel periodo eruttivo di luglio - dicembre 2006. Dall'andamento dei tassi d'effusione si può facilmente risalire alle diverse fasi eruttive che hanno caratterizzato l'attività in questo periodo. I risultati ottenuti sono stati confrontati con misure di campagna fatte durante l'eruzione dalla sezione INGV di Catania e sono disponibili sul sito WEB dell'istituto (<http://www.ct.ingv.it/>).

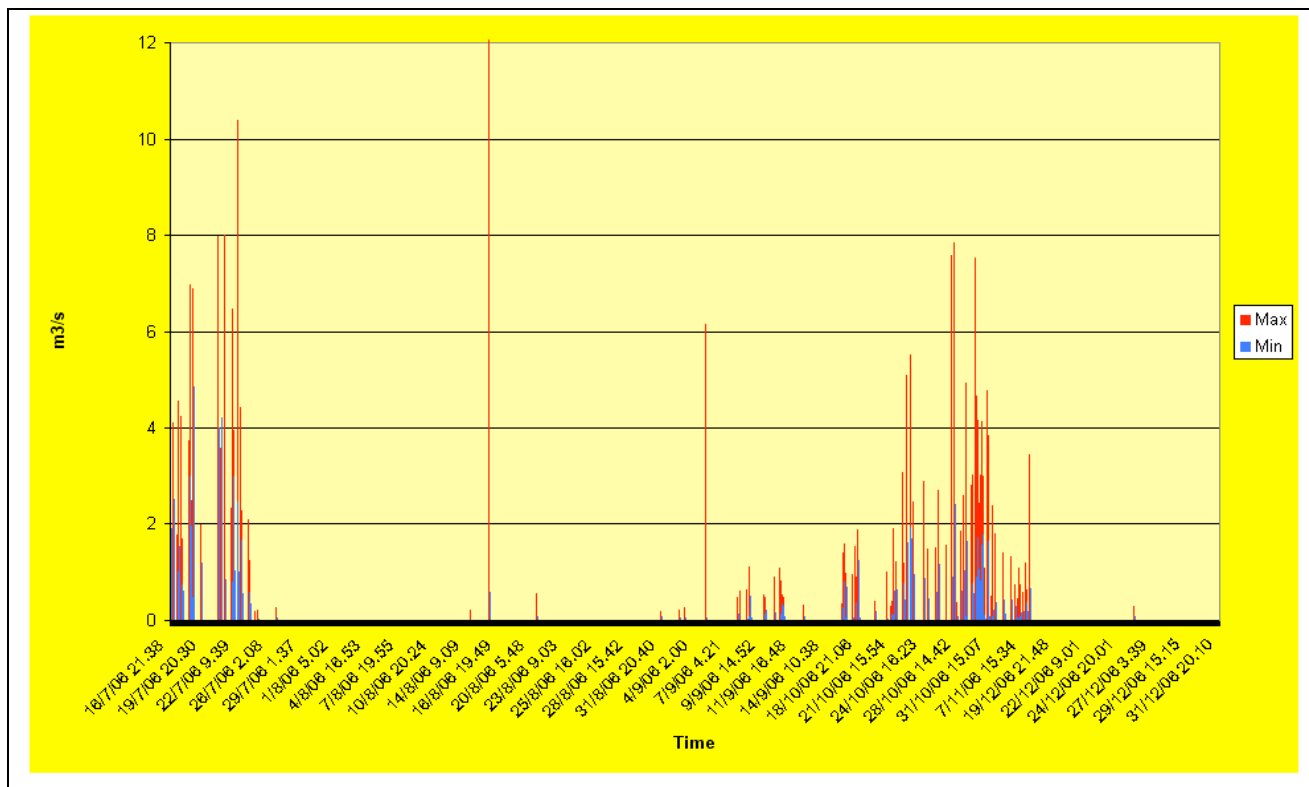


Figura 12 Tasso d'effusione massimo e minimo calcolato durante il periodo Luglio - dicembre 2006.

La serie storica di dati AVHRR è stato quindi confrontata con i dati di tasso d'effusione calcolato utilizzando le immagini del sensore MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) attraverso il programma MODVOLC sviluppato presso l'Università delle Hawaii in Honolulu, USA [Wright et al., 2002].

In Figura 13a sono stati confrontati i valori minimi derivati da *AVHotRR* con i valori minimi stimati dal sistema MODVOLC (*Hot Model*). Si può notare come i risultati derivati dai dati MODIS siano pienamente confrontabili con quelli ottenuti dai dati AVHRR. Lo stesso si può dire confrontando i valori massimi AVHRR con i valori massimi MODIS (*Hot Model*).

Confrontando i risultati ottenuti per il tasso effusivo usando AVHRR e MODIS si nota come, pur avendo lo stesso andamento, i tassi stimati con AVHRR risultano spesso inferiori a quelli di MODIS. Ciò potrebbe per esempio dipendere dalla saturazione della banda 3 oppure dalla modalità con cui vengono selezionati i pixel dell'anomalie termica.

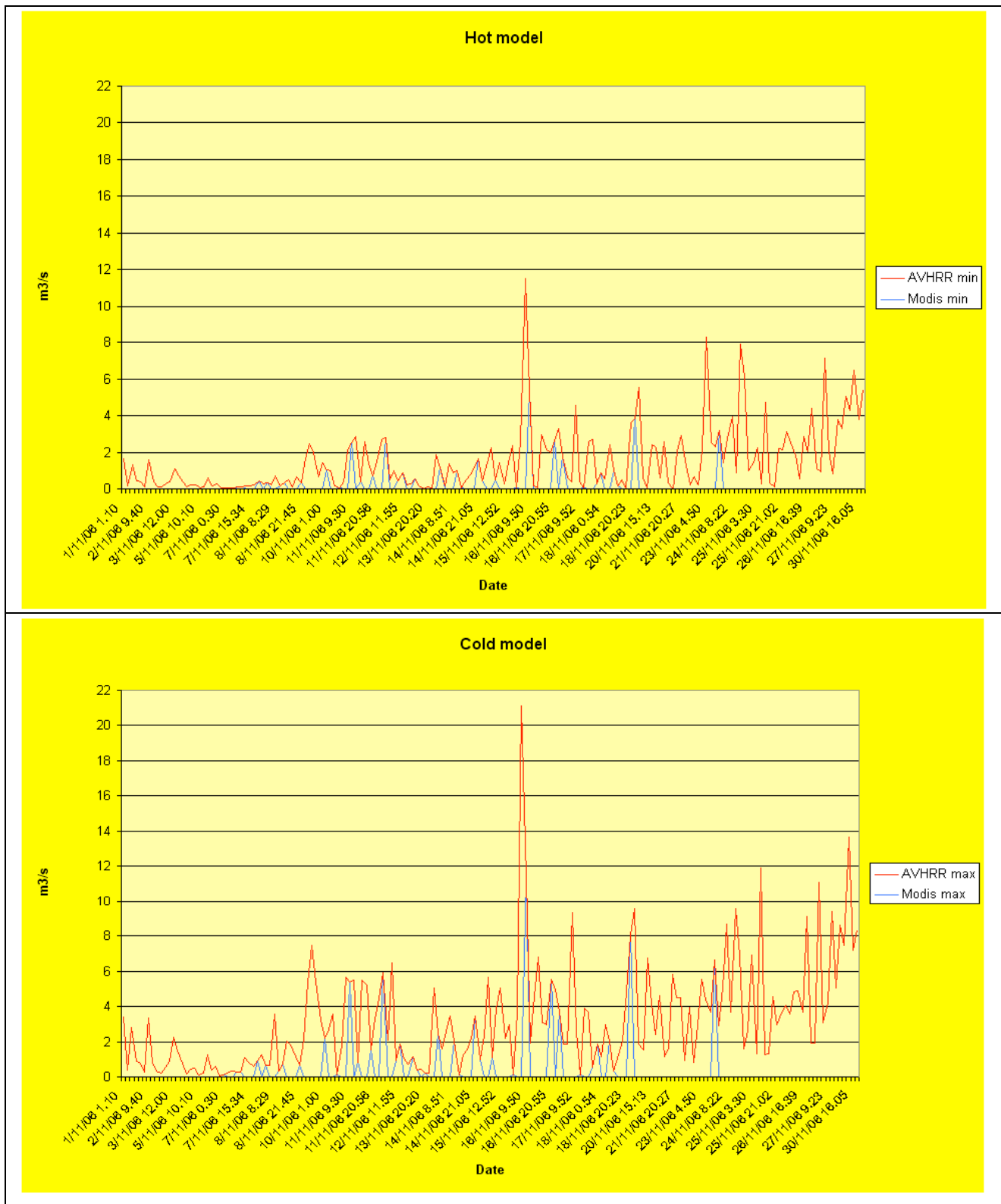


Figura 12 Tasso d'effusione massimo e minimo calcolato durante il periodo 5 novembre-3 dicembre 2006 e confronto con i dati MODIS per lo stesso periodo (Dal Bollettino INGV, Eruzione Etna 2006, cortesia del Dr. Andrew Harris, Università delle Hawaii in Honolulu, USA).

3.2 Analisi dell'errore nel calcolo dei parametri

Nel corso della descrizione del programma è già stata affrontata di volta in volta l'analisi dell'errore per i diversi moduli di calcolo. Tuttavia, può essere utile riassumere brevemente quali sono le principali sorgenti d'errore a partire dall'acquisizione del dato sino al calcolo del tasso d'effusione. Gli errori associati alla

stima del flusso termico e del tasso d'effusione possono dividersi in due principali categorie: errori dovuti alle caratteristiche intrinseche del sensore NOAA/AVHRR ed errori imputabili alle assunzioni del modello termico e della tecnica *dual-band*.

3.2.1 Errori dovuti alle caratteristiche del sensore

L' AVHRR non è stato originariamente progettato per lo studio d'eventi ad alta temperatura, ma soltanto in seguito è pensato di impiegare le bande del termico per il monitoraggio di vulcani attivi. Di seguito riassumiamo le principali sorgenti d'errore associate al calcolo della temperatura delle lave:

- Bassa risoluzione spaziale: i fenomeni vulcanici investigati sono solitamente ad una scala non confrontabile con la risoluzione di 1 km tipica del pixel AVHRR. Come ampiamente spiegato, per ovviare a questo problema si ricorre all'analisi sub-pixel, ma ciò comporta delle assunzioni nel modello termico a cui è associato un errore.
- Saturazione delle bande: i canali del termico, specialmente la banda 3, tendono a saturare facilmente se la frazione di pixel occupata dalla lava supera il 15-40%, secondo la temperatura della lava stessa. Se la banda 4 non è saturata, si può ugualmente procedere al calcolo della *dual-band* ma le stime di flusso termico e quindi di tasso d'effusione saranno sottostimate.
- Distorsione geometrica dovuti all'angolo di vista: i passaggi satellitari possono avvenire su orbite non nadirali rispetto alla posizione dell'Etna. Ovviamente, questo comporta un ricampionamento dei pixel tanto più pesante tanto maggiore è l'angolo di vista compreso tra la direzione Etna-sensore ed il Nadir.

3.2.2 Errori dovuti al modello termico

La tecnica *dual-band* applicata a dati AVHRR presenta delle limitazioni nella stima del flusso termico come già in parte illustrato nel corso della descrizione del programma. Anche in questo caso possiamo distinguere diverse fonti d'errore:

- Determinazione dell'anomalia termica: esistono diversi metodi per stabilire se un pixel "caldo" appartiene alla colata oppure ne è solo marginalmente influenzato. Ovviamente, includere o meno un pixel nel computo della *dual-band* significa aggiungere o sottrarre flusso termico alla stima del tasso d'effusione totale.
- Assunzione della temperatura di background: in genere si stabiliscono dei limiti massimo e minimo per la temperatura di background in corrispondenza dei quali si calcolano i relativi valori di tasso d'effusione. Si è osservato che quest'errore è in genere dell'ordine del 10-20%.
- Errore legato alla determinazione dei parametri geologici, fisici e reologici che compaiono nelle equazioni per il calcolo del flusso termico e del tasso d'effusione (vedere appendice).

Infine, a monte di queste valutazioni, non bisogna trascurare il processo di calibrazione del dato AVHRR che implica in particolare un'attenta valutazione degli effetti atmosferici sulla propagazione del segnale dalla sorgente al sensore. Per una dettagliata trattazione sugli errori commessi nell'uso della tecnica *dual-band* con dati AVHRR si rimanda ai lavori di Harris et al., 1997, Mouginiis-Mark et al., 1994 e Dehnet et al., 2002.

3.3 Statistica dei falsi allarmi

I dati AVHRR elaborati dal programma sono stati analizzati per un periodo di circa due anni da Giugno 2006 sino ad Aprile 2008. Si è visto che il numero dei falsi allarmi è direttamente proporzionale al codice d'errore riportato dal programma una volta che l'anomalia termica è stata individuata. Di seguito è riportata una tabella che illustra sommariamente i risultati di quest'analisi:

Codice d'errore	Numero di falsi allarmi
Effusion >>>	< di 1 %
Effus. Error	23 %
Eff.multi>>>	41 %
All rejected	78 %

Sulla base di questa statistica, si può affermare che il risultato "Effusion >>>" indica sicuramente la presenza di un evento eruttivo in corso.

Inversamente, la probabilità di trovarsi di fronte ad un falso allarme è del 78% quando tutti i pixel della presunta anomalia sono stati rigettati durante il calcolo della *dual-band*. Il rimanente 22% è stato associato a

reali fenomeni eruttivi ma caratterizzati da una forte presenza di nubi o *plume* vulcanici. Anche al codice “Effus. Error” è associata un’alta probabilità d’evento eruttivo. Come già spiegato nel paragrafo 2.5.2, tale codice si genera quando uno o più valori di tasso d’effusione sono rigettati. Tuttavia, i valori accettabili di E_r indicano spesso la presenza di un autentico evento caldo. La presenza di più di 2 *hot-spot* indica spesso la presenza di rumore nelle immagini. In genere le immagini solo rumorose non producono valori accettabili di tasso d’effusione. Se invece si ottengono valori accettabili di E_r , si è probabilmente in presenza di un evento eruttivo mascherato da una serie di false anomalie.

4. Futuri sviluppi ed implementazioni di *AVHotRR*

La versione di *AVHotRR* attualmente implementata (1.0) ha richiesto circa 12 mesi di sviluppo e quasi altrettanti per la fase di test e validazione dei prodotti. Questa versione è ora completamente operativa e fa parte di un pacchetto d’applicazioni destinato al Dipartimento di Protezione Civile, sviluppato nell’ambito del progetto Sistema Rischio Vulcanico (SRV) sovvenzionato dall’Agenzia Spaziale Italiana (ASI).

La futura evoluzione del programma seguirà essenzialmente tre linee di sviluppo:

- Implementazione di nuove funzionalità
- Implementazione di nuovi modelli termici
- Processamento di dati da altri sensori

4.1 Implementazione di nuove funzionalità

La prossima versione di *AVHotRR* conterrà sicuramente un modulo per la georeferenziazione delle immagini prodotte (*RGBimage*). Questo permetterà di visualizzare la posizione dell’anomalia termica in un sistema informativo geografico (GIS). Un’interfaccia di visualizzazione per i prodotti di *AVHotRR* è attualmente in fase di sviluppo nell’ambito del progetto ASI-SRV. Tuttavia si prevede in futuro di esportare le immagini georiferite nel sistema *Google-Earth*, in maniera che renderle accessibili a qualsiasi utente che non sia in possesso dell’interfaccia di visualizzazione SRV.

Per quello che concerne invece l’invio delle informazioni e il sistema d’*alert*, verrà presto implementata una routine che consentirà di spedire i messaggi anche tramite SMS. Questo permetterà agli operatori di essere informati in caso d’evento ovunque essi si trovino.

4.2 Implementazione di nuovi modelli termici

Il sistema di calcolo del tasso d’effusione si basa sull’assunzione che i pixel radianti AVHRR contenenti la colata siano costituiti da due soli componenti termiche: la lava e il background (appendice B). Inoltre, il modello prevede che l’emissività delle due componenti sia nota. Nel caso dell’Etna queste condizioni sono entrambi rispettate (vedi paragrafo 2.3), assumendo che l’emissività della lava calda sia uguale a quella della lava fredda (modello *sub-pixel*).

Sfortunatamente, il modello termico implementato per l’Etna non può essere direttamente applicato ad altri vulcani, quale ad esempio il vulcano Stromboli [Lodato et al., 2007]. L’isola di Stromboli ha un diametro di circa 2 km, che in termini di risoluzione spaziale si traduce in circa quattro pixel AVHRR. Questo significa che ogni pixel comprenderà sicuramente anche una porzione di mare e che in caso d’eruzione dovremmo prevedere un modello termico a tre componenti: lava, background di terra e background di mare. Inoltre, l’emissività del background di terra non può essere considerata omogenea come nel caso della sommità dell’Etna, ma andrebbe stimata considerando un valore medio comprendente varie tipologie di terreno (lava, vegetazione, ecc.). Assumendo di conoscere i valori d’emissività, ci troviamo comunque di fronte ad un sistema in 5 incognite (le temperature delle tre componenti e le frazioni di due delle componenti) e 2 equazioni (le bande MIR e TIR utilizzabili nel calcolo *dual-band*). Inoltre, per gli stessi problemi di risoluzione spaziale, sarebbe impossibile stimare la temperatura di background della componente di terra come spiegato al capitolo 2.3 (infatti il contorno dell’anomalia comprenderebbe soltanto pixel marini).

Analizzando l’intero database AVHRR, sarebbe invece possibile ottenere una statistica sull’andamento stagionale delle temperature di background, sia di terra che di mare. Questo permetterebbe di estrapolare i valori di T_b in qualsiasi giorno dell’anno e risolvere il sistema *dual-band* semplicemente assumendo un valore plausibile per una delle due frazioni di background.

4.3 Processamento di dati da altri sensori

Lo sviluppo naturale del programma prevede la capacità di ingerire e processare dati provenienti da altri sensori. Tra questi, quelli che si presentano meglio all'implementazione sono i dati del sensore MODIS, orbitante sui satelliti TERRA e ACQUA, e del sensore SEVIRI sul satellite geostazionario *MeteoSat Second Generation* (MSG). In particolare le caratteristiche spaziali, spettrali e radiometriche del MODIS, del tutto simili a quelle dell'AVHRR, dovrebbero consentire il processamento delle immagini semplicemente modificando il modulo di lettura dei dati di radianza. L'implementazione dei dati MODIS è attualmente prevista nel terzo anno di sviluppo del progetto ASI-SRV.

Diverso è il discorso per quello che riguarda l'implementazione dei dati del SEVIRI. Infatti, poiché la risoluzione spaziale di questo sensore è di circa 4 km, il futuro sistema di calcolo *dual-band* dovrà necessariamente prevedere un modello termico più complesso per le nostre aree vulcaniche. Tuttavia, l'elevata frequenza d'acquisizione (circa ogni 15 minuti) e la migliore radiometria per l'individuazione delle nubi, fanno del SEVIRI uno strumento importante per il monitoraggio delle aree vulcaniche mediterranee, come già dimostrato nel caso del sensore meteorologico geostazionario GOES [Harris et al., 2001].

Ringraziamenti

Il programma *AVHotRR* è stato sviluppato nell'ambito del progetto ASI Sistema Rischio Vulcanico, n°I/091/06/0. Ringrazio sentitamente il Dr. Andy Harris per la sua disponibilità e i preziosi consigli che hanno permesso di migliorare questo prodotto.

APPENDICE: Teoria per l'analisi delle anomalie termiche da dati telerilevati

A. Calcolo della temperatura superficiale

La *detection* delle anomalie termiche di alta temperatura si basa sulla legge di Planck, per cui i corpi neri con temperature prossime a quelle della lava, presentano il loro massimo di emissione, nella banda spettrale del medio infrarosso, compresa tra i 3 e i 4 μ m secondo la relazione:

$$R(\lambda) = \frac{\epsilon C_1}{\lambda^5 \pi (\exp(C_2/\lambda T) - 1)} \quad (A1)$$

dove $R(\lambda)$ è la radianza spettrale, ϵ è l'emissività, T è la temperatura del corpo nero e λ è la lunghezza d'onda. La valutazione della temperatura superficiale è di notevole interesse in ambito vulcanologico perché consente di studiare numerosi aspetti riguardanti le fasi d'attività attuali e l'evoluzione dei fenomeni avvenuti nel passato. La mappa di temperatura permette di ricavare il flusso di calore alla superficie e, quindi, di controllare l'attività all'interno di bocche e fratture nonché l'estensione di nuove colate laviche o il loro avanzamento. La temperatura cinetica della superficie e le proprietà emissive dei materiali possono essere stimate con elevata accuratezza disponendo di immagini acquisite nell'infrarosso termico su diversi canali. Solo pochi strumenti forniscono in quest'intervallo spettrale immagini multicanale ad alta risoluzione spaziale. Tra questi, i sensori iperspettrali aerotrasportati TIMS (della NASA), MIVIS (del CNR – Progetto L.A.R.A.) e DAIS (dell'ente aerospaziale tedesco DLR) e, a partire dal 2000, i sensori satellitari ASTER e MODIS a risoluzione spaziale e spettrale molto più basse.

Mappe di temperatura superficiale ed emissività spettrale sono state ottenute con dati TIMS [Buongiorno et al., 2002], MIVIS, DAIS per i sensori aerei e ASTER e MODIS per i sensori satellitari. Nel caso di MODIS va osservato che la risoluzione spaziale del sensore nel TIR è molto bassa (pixel di 1 ~Km di lato) e questo riduce di molto l'utilità del prodotto finale.

B. Tecnica Dual-Band

Seguendo l'analisi di Dozier [1981] e il modello proposto da Crisp and Baloga per le lave [1990], il flusso termico viene considerato come una funzione di due distinte superfici radianti a diverse temperature. Una temperatura relativa alla parte più calda e fusa della lava (T_h) e un'altra relativa alla crosta superficiale solidificata, e quindi più fredda (T_c). Se si dispone di un sensore ad immagine con almeno due bande nel *range* spettrale dello SWIR (*Short Wave Infrared*) o del TIR (*Thermal Infrared*) si può calcolare con la tecnica *dual-band* la temperatura della crosta e la percentuale di superficie relativa alle due componenti [Rothery et al., 1988]. Il sistema d'equazioni per determinare queste componenti può essere formalizzato come segue:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Rad}\alpha = f_h (R_h\alpha) + (1 - f_h) R_c\alpha \\ \text{Rad}\beta = f_h (R_h\beta) + (1 - f_h) R_c\beta \end{array} \right. \quad (B1)$$

dove $\text{Rad}\alpha$ e $\text{Rad}\beta$ sono rispettivamente la radianza totale registrata al sensore nelle bande α e β , R_{hx} è la radianza delle fratture incandescenti in banda x ($x = \alpha$ or β nel nostro caso), R_{cx} è la radianza della crosta in banda x e f_h è la frazione di pixel radiante alla temperatura più elevata T_h .

Poiché si tratta di un sistema con tre incognite (T_c , T_h e f_h) e due sole equazioni, bisogna necessariamente determinare una delle suddette incognite a priori. Partendo dall'assunzione che la parte fluida possiede una maggiore inerzia termica rispetto alla componente solida, si procede in genere attribuendo un valore plausibile (possibilmente sperimentale) alla temperatura delle fratture incandescenti. Tale limite potrebbe teoricamente essere superato risolvendo il sistema impiegando contemporaneamente tre bande distinte (*triple-band*). Di fatto la soluzione della *triple-band* risulta ancora problematica [Lombardo et al., 2006b], pur essendo disponibili da qualche anno sensori equipaggiati con più di 3 bande nello SWIR (addirittura 40 per il sensore Hyperion).

Ricordiamo che ogni passaggio orbitale per i sensori ad alta risoluzione spaziale (30m, come l'ASTER ed il Landsat TM) avviene con una periodicità di 16 giorni. Proprio la necessità di monitorare i fenomeni vulcanici con continuità ci costringe ad utilizzare strumenti ad alta frequenza di acquisizione ma con inferiore risoluzione spaziale. Tra questi possiamo annoverare l'AVHRR e l'ATRS che consentono l'acquisizione di più immagini nell'arco di una giornata ma il cui dettaglio si limita a 1 km di risoluzione.

Risoluzioni dell'ordine del chilometro non permettono ovviamente di investigare la struttura delle colate laviche in termini di percentuale di crosta e percentuale di fratture incandescenti. Tuttavia la tecnica *dual-band* è di fondamentale importanza nei sensori a bassa risoluzione per identificare due componenti primarie quali la porzione di lava attiva nel pixel e la percentuale di "background" non attivo. In questo senso, si utilizza una banda SWIR per caratterizzare la componente calda della lava e una banda TIR che risulta più adeguata a caratterizzare l'intervallo di temperature tipico del background più freddo. Il sistema d'equazioni 1a adattato ai dati AVHRR si può scrivere nella seguente forma:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Rad}3 = f_{\text{lava}} (R_{\text{lava}} 3) + (1 - f_l) R_b 3 \\ \text{Rad}4 = f_{\text{lava}} (R_{\text{lava}} 4) + (1 - f_l) R_b 4 \end{array} \right. \quad (B2)$$

Dove $\text{Rad}3$ e $\text{Rad}4$ sono la radianza totale registrata al sensore rispettivamente nelle bande 3 e 4 (vedi figura 1), R_{lava} è la radianza relativa alla temperatura integrata della lava (crosta più fratture incandescenti), R_b è la temperatura di background ed f_{lava} è la frazione di pixel occupata dalla lava. R_b viene generalmente calcolata dalla 1 assumendo un valore plausibile per la temperatura di background T_b .

C. Flusso termico

Una volta che T_c e f_h sono stati calcolati è possibile calcolare il flusso radiante (*radiant power* o *energy flux*) per ciascun pixel della colata lavica [Pieri et al., 1984]:

$$Q_{\text{lava}} = \epsilon A_{\text{pix}} \text{sbk} (T_{\text{lava}}^4 f_{\text{lava}} + T_b^4 (1 - f_{\text{lava}})) \quad (C1)$$

Dove Q_{lava} è il flusso, è ϵ l'emissività, sbk è la costante di Stefan-Boltzmann e A_{pix} è la superficie del pixel. Quest'ultima dipende ovviamente dalla risoluzione del sensore nelle bande SWIR utilizzate per la tecnica dual band. Landsat TM, ETM ed ASTER hanno tutti una risoluzione di 30 m nello SWIR; per essi il valore A_{pix} da usare nella precedente relazione sarà ovviamente 900 m^2 .

Diverso è il caso per sensori a bassa risoluzione. Come illustrato precedentemente, la tecnica *dual-band* permette di distinguere nel pixel la porzione di lava dalla porzione non attiva. Poiché soltanto la porzione di lava attiva determina l'ammontare del flusso radiante, la relazione sopra introdotta diventa:

$$Q_{\text{lava}} = \epsilon \text{sbk} T_{\text{lava}}^4 f_{\text{lava}} A_{\text{pix}} \quad (C2)$$

Il flusso totale di una colata (Q_{tot}) è associabile in gran parte al contributo radiante della colata stessa. Tuttavia è stato osservato un contributo ulteriore dovuto alla presenza di moti convettivi nella massa magmatica [Oppenheimer 1991, Harris et al., 1993]. Questo contributo (Q_{conv}) può essere determinato a

partire da dati satellitari a bassa e media risoluzione, integrati con informazioni di campagna, di laboratorio e con l'analisi di serie storiche.

Sensori ad alta risoluzione permettono inoltre di identificare la presenza di strutture vulcaniche quali *lava-pipe* e *skyhole*. Fenomeni di “ingrottamento” del magma possono sensibilmente variare la velocità di diffusione della lava con ripercussioni sensibile nella valutazione dell'avanzamento della colata stessa.

D. Tasso d'effusione

Il tasso d'effusione è il parametro principale che ci permette di fare stime sullo stato di avanzamento di una colata lavica in un periodo di crisi eruttiva.

L'accuratezza nel calcolo del tasso di effusione dipende dalla precisione con cui è calcolato il *total radiant power* (Q_{tot}). L'algoritmo per la stima del tasso effusivo (E_r) prevede l'implementazione della formula [Harris et al., 1998]:

$$E_r = \frac{Q_{tot}}{\rho_{lava} (c_{plava} \Delta T_{stop} + C_L \Delta \phi)} \quad (DI)$$

Dove ρ_{lava} e c_{plava} sono rispettivamente la densità e la capacità specifica della lava, ΔT_{stop} è l'abbassamento di temperatura lungo la porzione in moto della colata, $\Delta \phi$ è la frazione di cristalli generata dal raffreddamento ΔT_{stop} , C_L è il calore latente di cristallizzazione [Kilburn, 1990; Kilburn et al., 1993].

Poiché questi fattori dipendono dalla composizione e reologia delle lave, essi vanno identificati univocamente all'inizio del programma di calcolo. I valori attualmente implementati fanno riferimento a dati bibliografici per una tipica lava basaltica dell'Etna [Harris et al., 1993].

Bibliografia

- Buongiorno, M. F., Realmuto, V. J., and Fawzi, D., (2002). *Recovery of spectral emissivity from thermal infrared multispectral scanner imagery acquired over a mountainous terrain: A case study from Mount Etna Sicily*. *Remote Sens. Environ.* 79, 123–133.
- Behncke, B., and Neri, M., (2003). *The July-August 2001 eruption of Mt. Etna (Sicily)*, *Bull. Volcanol.*, 65, 461-476.
- Coltelli, M., Proietti C., Branca S., Marsella M., Andronico D., and Lodato L., (2007). *Lava flow mapping: the case of 2001 flank eruption of Etna*. *J. Geophys. Res.* 112, F02029, doi:10.1029/2006JF000598.
- Crisp, J., and Baloga, S., (1990). *A model for lava flows with two thermal components*. *J. Geophys. Res.* 95, 1255-1270.
- Dehn, J., K., Dean, G., and Engle, K., (2000). *Thermal monitoring of North Pacific volcanoes from space*. *Geology*. 28, 8, 755-758.
- Dehn, J., K., Dean, G., Engle, K., Izbekov, P., (2002). *Thermal precursors in satellite images of the 1999 eruption of Shishaldin Volcano*. *Bull. Volcanol.* 64, 525-534.
- Dozier, J., (1981). *A method for satellite identification of surface temperature fields of subpixel resolution*. *Remote Sens. Environ.* 11:221-229.
- Flynn, L. P., and Mougini-Mark, P. J., (1994). *Temperature of an active lava channel from spectral measurements, Kilauea Volcano, Hawaii*. *Bull. Volcanol.* 56, 297– 301.
- Flynn, L.P., Harris, A.J.L., and Wright, R. (2001). *Improved identification of volcanic features using Landsat 7 ETM+*. *Remote Sens. Environ.* 78, 180-193.
- Glaze, L., Francis, P.W., and Rothery, D.A., (1989). *Measuring thermal budgets of active volcanoes by satellite remote sensing*. *Nature*. 338: 144-146.
- Harris, A.J.L., Butterworth, A.L., Carlton, R.W., Downey, I., Miller, P., Navarro, P., and Rothery, D.A., (1997a). *Low cost volcano surveillance from space: case studies from Etna, Krafla, Cerro Negro, Fogo, Lascar and Erebus*. *Bull. Volcanol.* 59, 49-64.
- Harris, A.J.L., Blake, S., Rothery, D.A., and Stevens, N.F., (1997b). *A chronology of the 1991 to 1993 Mount Etna eruption using advanced very high resolution radiometer data: Implications for real-time thermal volcano monitoring*. *J. Geophys. Res.* 102, 7985-8003.
- Harris, A.J.L., Flynn, L.P., Keszthelyi, L., Mougini-Mark, P.J., Rowland, S.K., and Resing, J.A., (1998). *Calculation of lava effusion rates from Landsat TM data*. *Bull. Volcanol.* 60, 52-71.
- Harris, A.J.L., Flynn, L.P., Rothery D.A., Oppenheimer, C., and Sherman, S.B., (1999). *Mass flux measurements at active lava lakes: implications for magma recycling*. *J. Geophys. Res.* 104(B4), 7117-7136.
- Harris, A.J.L., Murray, J.B., Aries, S.E., Davies, M.A., Flynn, L.P., Wooster, M.J., Wright, R., and Rothery, D.A., (2000). *Effusion rate trends at Etna and Krafla and their implications for eruptive mechanisms*. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 102, 237-269.
- Harris, A.J.L., Pilger, E., Flynn, L.P., Garbeil, H., Mougini-Mark, P.J., Kauahikaua, J., and Thornber, C. (2001). *Automated, high temporal resolution, thermal analysis of Kilauea volcano, Hawaii, using GOES-9 satellite data*. *Int. J. Remote Sens.* 22(6), 945-967.
- Kilburn, C.R.J. (1990), *Surfaces of 'a'a flow-fields on Mount Etna, Sicily: morphology, rheology, crystallization and scaling phenomena*. In: *Lava flows and domes: emplacement mechanisms and hazard implications*, IAVCEI Proceedings in Volcanology, 2, edited by J.H. Fink, Springer, Berlin Heidelberg New York, pp 129–156.
- Kilburn, C.R.J., and Guest, J.E., (1993). *'a'a lavas of Mount Etna, Sicily*. In: *Active Lavas: monitoring and modeling*. edited by C.R.J. Kilburn, and G. Luongo, Univ. College of London Press, pp 73–106.
- Lodato L., Spampinato, L., Harris, A.J.L., Calvari, S., Dehn, J., and Patrick, M., (2007). *The Morphology and Evolution of the Stromboli 2002-03 Lava Flow Field: An Example of Basaltic Flow Field Emplaced on a Steep Slope*. *Bull. Volcanol.* doi 10.1007/s00445-006-0101-6, 69, 661-679.
- Lombardo, V., Buongiorno, M.F., Merucci, L., and Pieri, D.C., (2004). *Differences in Landsat TM derived lava flow thermal structure during summit and flank eruption at Mount Etna*. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 134/1-2:15-34.
- Lombardo, V., and Buongiorno, M.F., (2006a). *Lava flow thermal analysis using three infrared bands of remote sensing imagery: a study case from Mt.Etna 2001 eruption*. *Remote Sens. Environ.* 101/2:141-149.
- Lombardo, V., Buongiorno, M.F., and Amici, S., (2006b). *Characterization of volcanic thermal anomalies by means of sub-pixel temperature distribution analysis*. *Bull. Volcanol.* 68, 07-08, 641-651.
- Mougini-Mark PJ, Garbeil H, Flament P (1994) Effects of viewing geometry on AVHRR observation of volcanic thermal anomalies *Remote sens. Envir.* 48: 51-60.
- Oppenheimer, C. (1991). *Lava flow cooling estimated from Landsat Thematic Mapper infrared data: The Lonquimay eruption (Chile, 1989)*. *J. Geophys. Res.* 96, 21865-21878.
- Oppenheimer, C., Francis, P.W., Rothery, D.A., Carlton, R.W.T., and Glaze, L., (1993a). *Infrared image analysis of volcanic thermal features: Lascar Volcano, Chile, 1984-1992*. *J. Geophys. Res.* 98, 4269-4286.

- Oppenheimer, C. (1993b). *Thermal distributions of hot volcanic surfaces constrained using three infrared bands of remote sensing data*. Geophys. Res. Lett. vol.20, no.6, 431-434.
- Oppenheimer, C., and Francis, P.W., (1997). *Remote sensing of heat, lava and fumarole emissions from Erta Ale lava lake, Ehtiopia*. Int. J. Remote Sens. 18(8), 1661-1692.
- Pieri, D.C., Glaze, L.S., and Abrams, M.J., (1990). *Thermal radiance observation of an active lava flow during th June 1984 eruption of Mt. Etna*. Geology. v.18, 1018-1022.
- Rothery, D.A., Francis, P.W., and Wood, C.A., (1988). *Volcano monitoring using short wavelength infrared data from satellite*. J. Geophys. Res. 93, 7993-8008.
- Silvestri, M., Musacchio, M., Doumaz F., Caprara, F., (2008). *Sviluppo di software per il controllo automatico di macchine UNIX dedicate alla ricezione e archiviazione di dati satellitari relativi alla stazione NOAA TERASCAN*. Rapporto tecnico n°58.
- Wright, R., Flynn, P.F., and Harris, A.J.L., (2001). *Evolution of lava flow-fields at Mount Etna, 27-28 October 1999, observed by Landsat 7 ETM+*. Bull. Volcanol. 63, 1-7.